Jean Alias

LE RAIL



Tel un être vivant, le rail, à la fois symbole d'un mode de transport répandu dans le monde entier et pièce maîtresse d'une sécurité ferroviaire devenue proverbiale, naît, vit et meurt. Cet ouvrage a pour but d'exposer le détail des soins qui doivent l'entourer tout au long de son existence ; les mathématiques, l'électronique, la chimie, l'informatique, sont les outils indispensables à l'élaboration et au suivi d'un produit de haut de gamme de l'industrie sidérurgique qui a réalisé en quelques années de spectaculaires progrès. « LE RAIL » s'attache à traiter autant la technologie d'élaboration des rails neufs que les défauts dont ils peuvent être atteints sous l'action des efforts considérables auxquels ils sont soumis et les traitements préventifs et curatifs qui permettent d'en limiter les conséquences.

Chacun des chapitres attache une grande importance à l'aspect économique qui est un élément majeur dans le choix des matériaux, le contrôle en voie, la maintenance et enfin la possibilité de récupération par traitement en usines spécialisées de rails usés destinés après régénération à des lignes à trafic modéré.

Quarante années d'expérience professionnelle ont appris à l'auteur, Directeur honoraire de l'Equipement de la S.N.C.F. et Professeur honoraire à l'École nationale des Ponts et Chaussées que la recherche et une maintenance rigoureuse sont les éléments de base de la gestion des problèmes technologiques et économiques qui se présentent quotidiennement à l'ingénieur. Il espère que techniciens et gestionnaires des réseaux, quelle que soit leur importance, chargés des problèmes du rail, trouveront dans cet ouvrage des réponses aux questions qu'ils se posent : orientation à donner à la recherche concernant les problèmes mal résolus autant que gestion économique d'un produit à forte consommation.

maquette Jérôme Lo Monaco



1358

LE
RAIL

De la part de SPENO INTERNATIONAL,
avec ses compliments

CHEZ LE MEME EDITEUR

J. Mathivat	CONSTRUCTION PAR ENCORBELLEMENT DES PONTS EN BETON PRECONTRAINT
J. Mathivat et GY. Fenoux	PROCEDES GENERAUX DE CONSTRUCTION 2 – Fondations et ouvrages d'art
J. Mathivat et J.F. Bougard	3 – Travaux souterrains
G. Grattesat	CONCEPTION DES PONTS
D.T.U.	REGLES B.P.E.L. 83 ET ANNEXES. REGLES TECHNIQUES DE CONCEPTION ET DE CALCUL DES OUVRAGES ET CONSTRUCTIONS EN BETON PRECONTRAINT SUIVANT LA METHODE DES ETATS-LIMITES
G. Dreux, J. Mazars et M. Rimbœuf	COURS PRATIQUE DE BETON PRECONTRAINT REGLES B.P.E.L.
R. Lacroix, A. Fuentès et H. Thonier	TRAITE DE BETON ARME ADDITIF REGLES B.A.E.L. 83
P. Charon	CALCUL DES OUVRAGES EN BETON ARME SUIVANT LES REGLES B.A.E.L. 83 Théorie et applications
	EXERCICES DE BETON ARME SELON LES REGLES B.A.E.L. 83
J.P. Mougin	COURS DE BETON ARME : AUX ÉTATS-LIMITES SUIVANT LES REGLES B.A.E.L. 83 Calcul des éléments simples. Calcul des structures de bâtiment.

LE RAIL

par

Jean ALIAS

Directeur honoraire de l'équipement SNCF
Professeur honoraire à l'École Nationale des Ponts et Chaussées



61, boulevard Saint-Germain - 75005 Paris
1987

Si vous désirez être tenu au courant de nos publications, il vous suffit d'adresser votre carte de visite au :

Service « Presse », Editions EYROLLES,
61, Boulevard Saint-Germain
75240 PARIS CEDEX 05,

en précisant les domaines qui vous intéressent. Vous recevrez régulièrement un avis de parution des nouveautés en vente chez votre libraire habituel.

INTRODUCTION

La SNCF possède le record du monde de vitesse sur rails (380 km/h) et ses trains circulent à la vitesse commerciale la plus élevée de tous les réseaux (270 km/h pour le TGV et bientôt 300 km/h pour le TGV-Atlantique). Cependant la littérature ferroviaire de langue française est peu abondante et en particulier aucun ouvrage n'a encore été consacré au problème du rail, tout au moins à la connaissance de l'auteur. Quarante années d'expérience professionnelle en grande partie consacrée à la pose et à la maintenance de la voie l'ont conduit à rédiger ce livre avec l'espoir de faire bénéficier de nombreux réseaux des connaissances acquises par la SNCF dans le domaine du rail.

Mais l'expérience passée n'est pas tout, loin de là, car les progrès foudroyants de la science moderne entraînent à courte distance ceux de la technologie et le rail, comme d'ailleurs l'ensemble de l'infrastructure et de la superstructure de la voie ferrée se sont pliés à la règle commune et tant dans sa conception générale que dans son élaboration, sa pose et sa maintenance, le rail actuel est très différent, malgré les apparences, de son prédécesseur d'il y a une trentaine d'années.

Si par ailleurs, les progrès faits autrefois au fil des années faisaient surtout appel à l'expérience et à l'empirisme et se traduisaient par des modifications très progressives apportées aux rails existants en vue d'en corriger les défauts, la technologie s'appuie maintenant sur toutes les ressources de la science et on constatera tout au long des

divers chapitres que des appels de plus en plus importants sont faits aux mathématiques, à la physique, la chimie, l'informatique.

Mais la technique n'est pas un but en soi : le rail n'est qu'un élément, important certes puisque sur lui repose une grande part de la sécurité ferroviaire, d'un vaste ensemble destiné à transporter voyageurs et marchandises à des prix compétitifs, de sorte qu'aucune solution technique, si brillante et satisfaisante pour l'esprit soit-elle, n'est viable si elle n'apporte à l'exploitant une rentabilité suffisante. Les problèmes de prix de revient et de rentabilités comparées des diverses solutions en présence sont donc abordés aussi largement que possible, d'autant que la consommation annuelle de rails pèse souvent assez lourd dans les budgets des réseaux. L'auteur sait d'expérience qu'une maintenance au sens le plus général du terme bien planifiée et bien conduite peut être à l'origine d'économies spectaculaires dans les budgets d'entretien des installations fixes.

Il convient encore de faire deux remarques fondamentales ; tout d'abord, les expériences en voie sont très longues (au minimum plusieurs années) ; elles ne peuvent donc que s'accomoder d'un subtil dosage de recherche de laboratoire et toute mutation importante présente un certain risque à terme.

En outre, l'amalgame nécessaire entre la recherche et la pratique suppose d'excellentes liaisons entre les divers fournisseurs, plus particulièrement l'industrie sidérurgique et les réseaux utilisateurs ; les travaux en commun menés en France dans cet esprit sont en grande partie responsables de la qualité du rail et des voies français et de la réputation qu'ils ont acquis dans le monde entier.

L'auteur adresse enfin de chaleureux remerciements à tous ceux qui ont bien voulu relire certains chapitres et le faire profiter de leurs connaissances et de leurs remarques. Je citerai plus particulièrement M. Prudhomme, Directeur honoraire et M. Montagne, chef du département "Recherches Voie" de la SNCF qui, avec M. Janin, ont permis par leurs travaux la réalisation de la voie TGV, M. Prasil de la division "Rails" de la SNCF, M. Vicens, Directeur des Études et Recherches à Uni-métal et les ingénieurs des firmes Matix, Speno, Aluminothermique et Delachaux, plus particulièrement MM. Turbe, Noualle, Ordax et Cooper. Ils ont également permis d'illustrer suffisamment cet ouvrage.

Le but principal de ce livre est d'aider les réseaux à faibles moyens, c'est-à-dire ceux dont l'importance limitée ne permet pas d'avoir leur propre service de recherches. Cette aide porte sur les choix techni-

ques liés à des décisions économiques portant essentiellement sur les conditions de fabrication, d'achat, de contrôle et maintenance en voie et de travail en atelier. Le respect des conditions correspondantes est essentiel au double point vue de sécurité et prix de revient.

Pour ceux qui s'intéressent de plus près aux problèmes du rail, ce livre montrera que, malgré des progrès techniques et économiques spectaculaires, de nombreuses questions n'ont pas encore reçu de réponses entièrement satisfaisantes et que des problèmes tels que ceux qui concernent la fragilité des aciers durs, la soudure, les réparations en voie, les origines de l'usure ondulatoire continuent d'exciter la sagacité des chercheurs. Ce n'est qu'au prix de progrès techniques efficaces que le transport par voie ferrée pourra pleinement mettre en valeur vis-à-vis de ses concurrents ses qualités fondamentales de sécurité, vitesse et faibles nuisances sur l'environnement. Et le rail doit alors rester au premier plan des préoccupations des réseaux.

TABLE DES MATIÈRES

1 HISTORIQUE ET GÉNÉRALITÉS

1. Généralités

1.1. Né en Angleterre vers 1830, le chemin de fer a été l'un des éléments moteurs de l'explosion industrielle qui marque le monde moderne, du fait de la nécessité, pour alimenter à la fois les usines et les centres de consommation, d'utiliser un moyen de transport de masse, sûr et rapide (1).

Dès les premières années de son existence, le chemin de fer a fait preuve de ses qualités fondamentales, sécurité, régularité, rapidité, dues essentiellement au contact fer sur fer de la roue sur le rail, et au guidage assuré par ce dernier. C'est dire que le rail est la pièce maîtresse de l'infrastructure ferroviaire : c'est un élément de sécurité dont la rupture brutale peut provoquer une catastrophe ; mais, l'aspect économique est tout aussi important, car les 2 millions de kilomètres de voies ferrées existant dans le monde représentent environ 200 cents millions de tonnes d'acier. On conçoit que, depuis un siècle et demi, les sidérurgistes et les spécialistes de la voie se soient penchés sur le tryptique sécurité, qualité et économie, et aient permis des progrès spectaculaires, particulièrement ces dernières années

(1) Depuis 1830, les volumes de marchandises et voyageurs transportés en France, exprimés en tonnes-kilomètres, ont été multipliés par 100 et 1 000.

dans le rapport qualité/prix des rails proposé par les fabricants aux utilisateurs.

L'empirisme du début a progressivement fait place à une approche scientifique des problèmes posés : cette approche a généralement donné lieu à un travail en commun des producteurs et des sociétés ferroviaires, particulièrement fructueux sur le plan des résultats obtenus. Les mathématiques, la physique, la chimie, plus récemment l'informatique, ont chacune apporté plusieurs pierres à l'édifice, ce qui permet d'affirmer que, bien que semblable extérieurement à son arrière grand-père, le rail moderne est un produit totalement différent.

1.2. L'aspect technique, bien sûr séduisant pour les ingénieurs, n'est pas le seul en cause : dans toute entreprise, le point de vue économique des problèmes est primordial, c'est souvent une question de vie ou de mort. Le rail n'échappe pas à la règle : une estimation grossière permet de chiffrer à bien plus de 100 millions le tonnage des rails en voie dans le monde, soit à 350 milliards de FF (30 milliards de dollars US), le capital correspondant ; on conçoit que les dirigeants et ingénieurs des réseaux attachent à ce problème une attention toute particulière. A la SNCF, la dépense annuelle en rails est de l'ordre de plusieurs centaines de millions de FF et représente quelque 10 % des dépenses d'entretien de la voie. Toute solution technique brillante n'est donc acceptable que dans la mesure oü la rentabilité résultant de sa généralisation est suffisante.

1.3. Il est en outre fondamental de faire appel à une importante source d'économies : une maintenance attentive qui permet de faire durer les rails jusqu'au bout de leurs possibilités. Les traitements de diverses natures, qui se sont développés avec l'appui de techniques de pointe, ont précisément pour but de maintenir le rail en état, soit sur place, soit après traitement en usine, en vue d'une gestion aussi économique que possible. Bien qu'ingrate et, en apparence, mais en apparence seulement, coûteuse, la maintenance des voies, et plus particulièrement du rail, est un impératif absolu pour que chaque réseau puisse répondre aux demandes de la clientèle, voyageurs ou marchandises ; toute négligence dans ce domaine, bien que peu sensible pendant quelques années, conduit infailliblement à terme à une situation catastrophique ; à notre sens, tout réseau plus ou moins

négligé, doit avant tout passer par une remise en état de sa superstructure.

2. Historique

2.1. La roue, de même que son guidage par des ornières creusées par les véhicules dans le revêtement de la chaussée, sont connus depuis l'antiquité babylonienne. Dans certains cas, ces ornières ont même été constituées par des troncs d'arbres creux, préfiguration du rail moderne.

La conception actuelle trouve son origine au XVIe siècle en Transsylvanie où certaines mines étaient desservies par des chariots déplacés à main d'homme sur des poutres en bois, véritables ancêtres du rail. Des gravures de ''De re metallica'' (1556) et de la ''Cosmographica universalis'' (1550) illustrent ce procédé. L'Angleterre adopta ce système en 1604 (mine de charbon voisine de la TYNE) en utilisant des madriers de pin, puis des profils composites (pin revêtu de bois dur) pour réduire l'usure. Ces procédés utilisant soit la roue à gorge, soit une ornière, se sont largement développés au cours du XVIIIe siècle. Mais, simultanément, la conception du rail profita du rapide développement de la métallurgie à cette époque (2) : en 1738, dans la mine de WHITEHAVEN, on protégeait le bois par des plaques de fonte ; en 1767, RICHARD REYNOLDS proposait le premier rail métallique, en fonte, et de section en L permettant l'emploi de tous les types de roues. Ce genre de rail, de 3 pieds de long, était introduit en France en 1779. En 1789, WILLIAM JESSOP créa l'''edge rail'', avatar d'origine du rail actuel, longitudinalement en forme de ventre de poisson (solide d'égale résistance) et dont les extrémités comportaient des sortes de patins fixés sur des dés en pierre d'environ 0,60 m de côté (fig. 1). Ce type de pose, où des coussinets fixés par crampons dans des chevilles de bois dur, scellés au goudron dans la pierre, assuraient le maintien du rail, était encore en usage lors de la naissance, en 1804, de la première locomotive à vapeur, celle de TREVITHICK.

---

(2) A titre anecdotique, on signalait encore l'existence de rails en bois dans certains réseaux des Landes du XIXe siècle, et en Suède en 1921, en zone forestière.

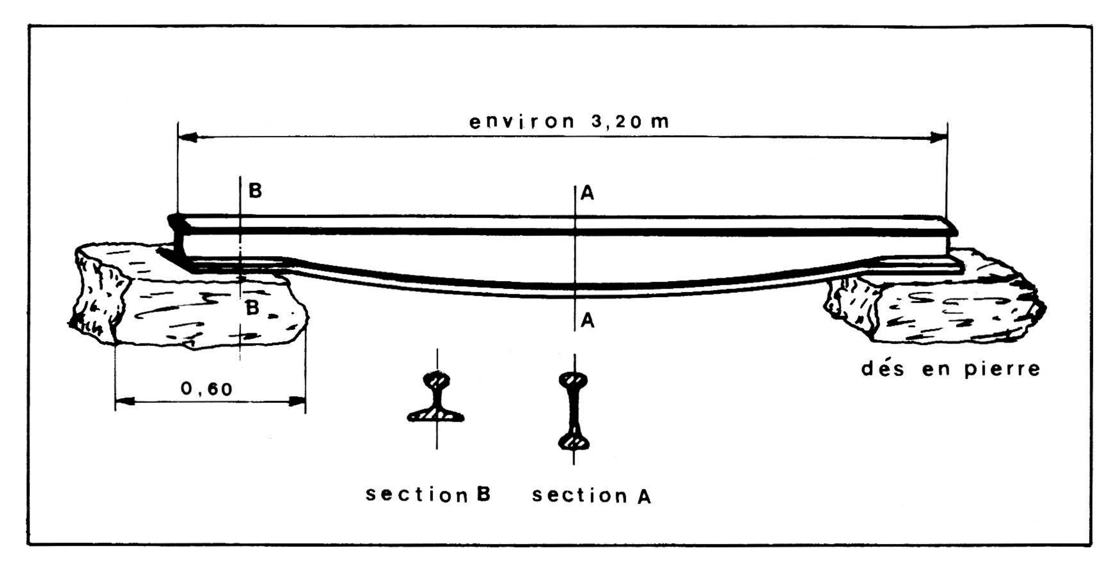


Fig. 1. — *Edge Rail de JESSOP*

L'année 1810 vit l'apparition du premier rail en fer et, le 23 octobre 1820, JOHN BIRKINSHAW, des aciéries de BEDLINGTON, prit un brevet de fabrication par laminage de rails en fer "puddlé" (3). Avec toujours le même type de pose, on atteignait, à cette époque, des longueurs de 13 à 15 pieds, pour un poids de 26 livres par yard (env. 13 kg/mètre). Des rails analogues (4,57 m, 14 kg) équipèrent la première ligne de chemin de fer, de STOCKTON à DARLINGTON où, dès le départ, fut adopté l'écartement de 4 pieds et 8 pouces 1/2 (1,437 m).

2.2. Ce fut l'Américain ROBERT LIVINGSTONE STEVENS (1787-1856) qui conçut en 1830 le profil moderne du rail à patin, introduit en Europe en 1839 par l'Anglais CHARLES BLACKER VIGNOLES (1793-1875), qui a curieusement perdu son S final en passant à la postérité. Néanmoins, jusqu'en 1844, date de construction du premier laminoir américain (4), les États-Unis restèrent fidèles au rail en bois recouvert d'une plaque métallique, du fait du coût trop élevé

---

(3) Le "puddlage" avait été inventé en 1784 par l'Anglais HENRY CORT.

(4) Le premier rail américain laminé en 1844, de 42 livres par yard, en forme d'U renversé, n'eut qu'un succès éphémère.

du rail anglais importé. Ce fait mérite d'être noté, car il montre que les préoccupations d'ordre économique pesaient déjà d'un poids bien lourd au début du XIXe siècle, et que cet aspect des choses joue un rôle primordial dans un produit d'aussi grande consommation que le rail.

Puis, jusqu'au développement de l'éclisse (1860) on lamina... aux USA des rails compound dont chacune des parties décalées l'une par rapport à l'autre, assurait au joint une certaine continuité irréalisable directement avec les rails à champignon piriforme. A cette époque (1848) on avait déjà atteint un profil de 92 livres (46 kg/m). Le rail à double champignon (fig. 2) avait entre temps vu le jour ; mais, bien que destiné à vivre encore pendant un siècle, il céda assez rapidement le pas au profil Vignole.

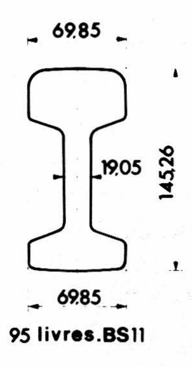


Fig. 2. — *Profil à double champignon*

Mentionnons aussi le rail Brunel en forme d'U renversé, d'existence éphémère, et le rail BARLOW en V renversé, très évasé (fig. 3), destiné à reposer directement sur le ballast, et qui jouait ainsi le double

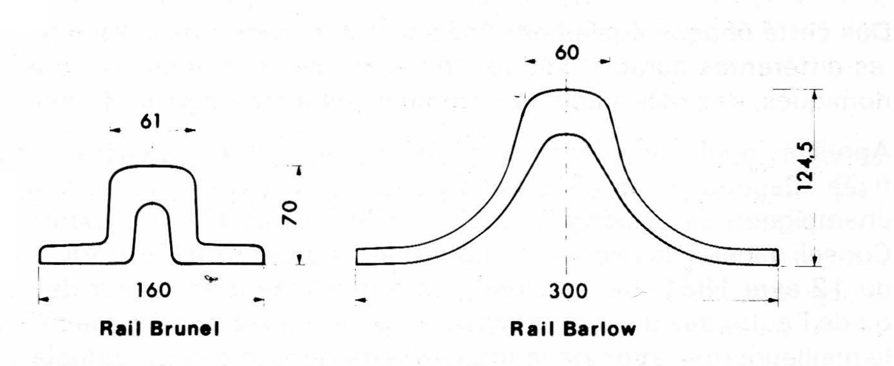


Fig. 3. — *Profils BRUNEL & BARLOW*

rôle de chemin de roulement et de longrine. Il équipa 1000 km de voie en Angleterre, puis, par imitation, en 1852, la ligne de ''BORDEAUX à CETTE''. Mais, ce fut un échec total, car ce rail s'ouvrait dans le sens de la longueur.

2.3. Malgré ces vicissitudes et ces tâtonnements, dès le milieu du XIXe siècle, les ingénieurs avaient bien reconnu les caractéristiques fondamentales à exiger d'un rail.

A cette époque, les rails étaient laminés sous forme d'un paquet de barres plates, d'environ 250 kg, appelées couvertes. Les parties supérieures et inférieures soumises à usure étaient constituées d'une bande de fer corroyé de 11 à 12 mm d'épaisseur, à grain fin. La partie centrale était en fer puddlé brut, moins dur, mais moins cassant. Après chauffage à blanc de l'ensemble, on procédait au laminage.

Les principales difficultés provenaient des ruptures des parties extérieures plus résistantes à l'usure, mais beaucoup plus cassantes, et de la médiocre soudabilité de cet ensemble hétérogène, d'où des exfoliations. La durée de vie des rails en fer ne dépassait pas cinq ans.

Les problèmes économiques étaient de plus en plus à l'ordre du jour et il est amusant de lire la phrase suivante dans une publication ferroviaire (CURTEL) datant de 1857 :

> '' Il ne nous a jamais été possible de relever des chiffres exacts sur les livres des fabrications. Messieurs les maîtres de forge sont très cachottiers ; surtout avec les employés des Compagnies. Ils disent rarement la vérité ; ils accumulent toujours des chiffres plus élevés qu'ils ne le sont réellement.''

Dès cette époque également, l'incidence du cahier des charges sur les différentes caractéristiques, qu'elles soient techniques ou économiques, des rails à acheter, commençait à être mise en évidence.

Après les bouillonnements du début (fig. 4), la forme générale était fixée. Cependant, la discussion entre les types Vignole et double champignon se prolongea jusqu'à la fin du siècle. Un rapport au Conseil général des Ponts et Chaussées (rapport BRAME et VICAIRE du 12 avril 1881) ne concluait pas formellement en faveur de l'un ou de l'autre des deux procédés. Ce rapport insistait néanmoins sur la meilleure utilisation de la matière faite dans le cas du Vignole et, par conséquent, la possibilité d'un rail de profil plus faible ; sur la dif-

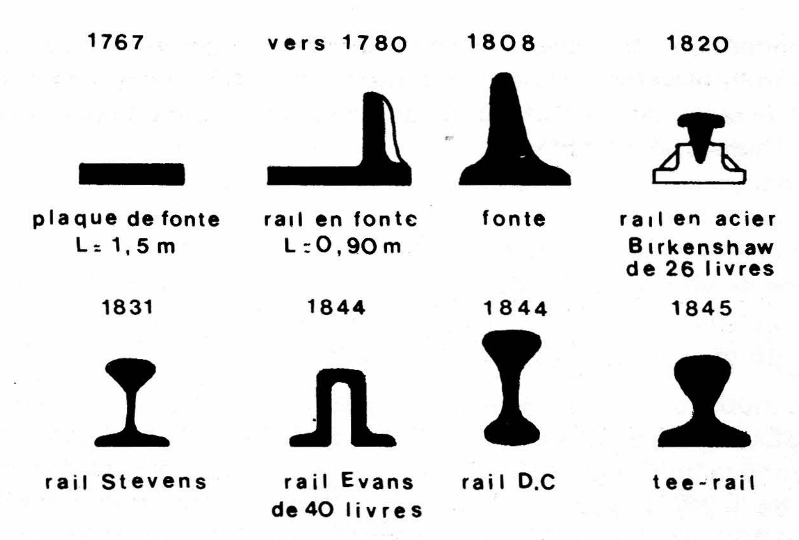


Fig. 4. — *Profils d'origine*

ficulté d'utiliser le rail à double champignon par retournement, d'autant qu'une bonne utilisation de la matière conduit à concevoir un profil dissymétrique et, en contre-partie, sur la meilleure facilité de laminage du rail à double champignon et sa meilleure adaptation par suite de la grande surface d'appui du coussinet aux traverses en bois tendre.

En 1847, les éclisses, inventées par l'Anglais WILLIAM BRIDGES ADAMS firent leur apparition sur Dusseldorf-Elberfeld. Jusqu'alors, les rails étaient en fer, car on ne savait fabriquer l'acier qu'en creuset, en petite quantité. Un rail en acier, élaboré de cette façon, fut essayé avec succès dès 1860 sur la ligne d'Auteuil. Le brevet de BESSEMER, en date de 1853, fut à l'origine de la sidérurgie moderne et, cinq ans plus tard, en 1858, il proposa le rail en acier, généralisé en France 20 ans plus tard, avec les procédés THOMAS et MARTIN.

2.4. Le passage du fer à l'acier en une quinzaine d'années apporta un profond changement dans la conception de la maintenance. Certes, le rail en acier était plus fragile, mais il était plus résistant et pouvait admettre des charges plus lourdes, ou, à charge égale, voir son profil diminuer. Mais, surtout, il était beaucoup plus résistant à l'usure et l'expérience mit rapidement en évidence une longévité plus de dix fois supérieure à celle du rail en fer. Le nouveau rail pouvait supporter de 100 à 200 millions de tonnes.

La conception générale du rail était dès lors acquise. Est-ce à dire que ce produit n'a plus évolué ? Bien que ce soit peu visible extérieurement, le rail a subi de profondes mutations technologiques qui en font un produit totalement différent des premières ébauches. Aux 2 tonnes par essieu du concours de Rainhill et aux 3 tonnes de la "Rocket" de Stephenson se sont substituées les 35 tonnes de certains chemins de fer ; aux 6 km/h du début a succédé le record du monde de vitesse SNCF de 380 km/h. Des trains de 50 000 tonnes ont vu le jour aux USA et, malgré cela, le rail est caractérisé par une sécurité et une longévité peu communes.

Nous nous bornerons à signaler que, dès 1852, le procédé de BESSEMER offrait des résistances de 500 N/mm². On obtenait 600 N/mm² à la fin du siècle (5), 700 entre les deux guerres, et largement plus de 1 000 aujourd'hui. Le poids par mètre qui atteignait 40 kg vers 1900, et plus de 50 kg vers 1920, dépasse aujourd'hui 70 kg. Un rail moderne doit supporter sans faiblir un milliard de tonnes de trafic, avec un taux de rupture extrêmement faible.

2.5. Au cours du siècle, le profil des rails utilisés en France s'agrandit rapidement : environ 20 kg/m vers 1840, de 25 à 30 en 1850, de 37 à 38 en 1860, chaque réseau adoptant malheureusement un profil différent. Pour des raisons de fabrication et de manutention, les longueurs étaient comprises entre 5,5 m et 8 m. Mais la qualité de l'acier était déjà remarquable puisqu'en 1881, la compagnie du Nord utilisait un acier de 600 à 700 N/mm² de résistance à la rupture, avec 10 à 20 % d'allongement, et la compagnie du Midi un rail de 790 à 830 N/mm², avec 4 à 11 % d'allongement.

C'est entre 1880 et 1900 que, en Europe, le poids du mètre de rail passa de la fourchette 30/40 kg à la fourchette 40/50 kg et se stabilisa ensuite jusque vers 1930, date à partir de laquelle on commença à laminer des rails sensiblement plus lourds (62 kg PLM en 1932, 63 kg NS en 1947, 60 kg FS en 1951). C'est donc par sauts brusques et augmentation de 20 à 50 % que les profils se sont développés.

Aux USA, les profils ont progressé de façon parallèle : 50 kg/m (100 livres) en 1900, 65 kg/m en 1916, 70 en 1946, et 77,5 en 1947 (155 livres).

---

(5) Dès 1854, on a atteint une charge de 12 tonnes par essieu.

Mais les décisions prises n'étaient justifiées par aucune considération théorique, ni même empirique, sinon par le souci de rendre la voie apte à répondre aux constantes augmentations de charge par essieu, de tonnage supporté, et de vitesse. On avait en outre constaté qu'une meilleure tenue du joint allait de pair avec le développement des profils, ce qui s'explique par le fait que le rapport du moment d'inertie verticale de l'éclisse à celui du rail croît à peu près comme la puissance 1.5 du poids métrique du rail. Il en résultait bien évidemment des économies de maintenance.

Dans la seconde moitié du XIXe siècle, la consommation de rails augmenta rapidement du fait du développement du chemin de fer et de la construction de nouvelles lignes. A partir de 1871, on consommait en France environ 200 000 tonnes de rails par an moitié en fer, moitié en acier, en longueurs de 6, 8 ou 9 m. En 1872, les États-Unis produisirent 800 000 tonnes de rails, dont 90 % en fer ; en 1877, 332 550 tonnes de rails en fer et 432 169 tonnes en acier ; 1 600 000 t en 1883, la quasi totalité en acier. La même année, la Grande-Bretagne exportait 413 800 t de rails, dont 233 450 en acier et, en 1878, 360 560 t, dont 249 880 en acier. La part du fer chutait donc verticalement, et la fabrication de rails en fer disparut en 1885 (6).

Il est frappant de constater que, vers les années 1880, la fabrication du rail représentait près des trois quarts de la production totale d'acier.

Les prix évoluèrent en sens inverse : la tonne de rails en fer coûtait F 210.— or en 1886 ; la tonne de rail en acier F 400.— en 1870 ; mais F 250.— en 1871, et le prix descendait progressivement jusqu'à F 100 en 1890.

2.6. A partir de 1900, outre l'aspect géométrique qui avait atteint sa forme quasi définitive, les progrès portèrent largement sur l'amélioration de la qualité de l'acier, qui laissait encore à désirer, et pouvait être à l'origine de ruptures aux conséquences graves (7) : par exemple, vers 1925, les plus gros défauts mentionnés par les utili-

(6) En France, 135 000 t en fer et 40 000 t en acier en 1869, 50 % de chaque en 1875, 20 000 et 340 000 t en 1883.

(7) Le rail en acier était fragile à ses débuts ; vers 1870/80, le PLM observait un taux de rupture total de 1,2/1000 rails après cinq années de pose.

sateurs portaient sur l'écrasement et l'écoulement du métal, la ségrégation, et surtout la fragilité pouvant entraîner des ruptures multiples au passage des trains. Les cahiers des charges successifs permirent d'apporter progressivement des remèdes aux principaux défauts. Il faut noter qu'après la première Guerre mondiale, il existait encore en France 21 producteurs de rails.

Des progrès décisifs résultèrent en France d'une intervention du Ministre des Travaux publics auprès des réseaux en date du 15 août 1925. Le Comité de direction des grands réseaux créa en plein accord avec le Comité des forges une "Commission mixte des rails" qui, depuis plus de 60 ans, a progressivement permis des améliorations considérables dans les conditions d'élaboration de l'acier à rails. Dans le cadre de cette Commission, un groupe mixte de travail (GMT) met en présence les techniciens des producteurs et des utilisateurs qui travaillent en commun sur la base d'expériences personnelles, d'essais, de recherches, et à l'aide d'une abondante documentation statistique.

Expérimentalement, la seule révolution visible, mais porteuse de progrès considérables, accomplie avant guerre, a été l'introduction, puis la généralisation à partir de 1949 des rails soudés de grande longueur, en fait sans aucune limitation théorique de longueur.

3. Le rôle du rail

Le rail sert de support vertical aux roues des véhicules, et de guide transversal pour les boudins des roues. Cette dernière notion est très importante, car elle est à la base de certaines des qualités fondamentales du chemin de fer : faible encombrement et facilité d'automatisation, donc source d'économies, possibilité de grandes vitesses. Grâce au phénomène d'adhérence, le contact métal sur métal de la roue sur le rail permet d'assurer la propulsion des engins moteurs. Le coefficient de frottement étant faible (0,10 à 0,35 suivant l'état de surface, le taux d'humidité, la vitesse), une puissance relativement peu élevée, fournie par une seule locomotive, conduite par un mécanicien, permet d'assurer la traction de trains très lourds. Par contre, les rampes et pentes sont sensiblement plus faibles que sur la route, encore que les profils en long TGV et autoroutes soient les mêmes, et les distances de freinage importantes, d'où la nécessité d'une signalisation d'autant plus sophistiquée que les vitesses sont plus élevées.

4. Caractéristiques générales

4.1. Le rail doit être considéré sous son double aspect géométrique et métallurgique. L'analyse des contraintes auxquelles il est soumis nous montrera que le rail doit avoir la plus grande inertie verticale possible pour un poids donné ; les considérations d'éclissage, moins importantes depuis le développement des longs rails soudés (LRS), la concentration des contraintes dans les raccords de faible rayon, la nécessité d'une bonne fixation sur le support constitué par des traverses ou des dalles, orientent le tracé géométrique du rail, la forme générale la plus satisfaisante étant celle du rail Vignole.

Dans l'esprit des promoteurs du rail à double champignon, apparu entre 1830 et 1840, le retournement du rail après usure du champignon devait permettre de doubler sa durée de vie. Malheureusement, l'encochage du rail par les coussinets supports empêcha de passer du rêve à la réalité. Toutefois, sa facilité de laminage, sa symétrie limitant les contraintes internes lors du refroidissement, et l'appui important représenté par le coussinet dans les pays utilisateurs de traverses en bois tendre (surface d'appui allant jusqu'à 680 cm^2), entraînèrent la poursuite du laminage de ce rail pendant un siècle, malgré la complication de la pose sur coussinets.

Toutes les autres tentatives ont échoué, et seul le rail Vignole est actuellement utilisé, en dehors de profils spéciaux tels que le rail Brunel (rail pour portiques) et le rail à gorge encastrable dans les chaussées (rails de tramways, voies de ports) (fig. 5).

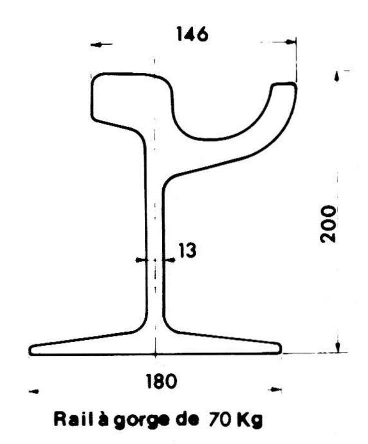


Fig. 5. — *Rail à gorge*

L'aspect métallurgique est beaucoup plus complexe, car on demande à l'acier à rail de posséder des qualités contradictoires : il ne doit pas être fragile, donc à bas carbone, mais résistant à l'usure surtout dans les courbes, donc à haut carbone. Il doit être soudable et, enfin, correspondre, comme nous l'avons vu, à une production économique de masse : c'est dire que l'emploi d'aciers spéciaux doit être strictement limité. Ces contradictions n'ont pu être résolues que par un très important effort de recherche, tant de la part des producteurs que des utilisateurs, souvent en commun, pour le plus grand bénéfice des deux. Il en est résulté le rail actuel, produit de haut de gamme, qui réalise un heureux compromis entre toutes les tendances centrifuges auxquelles il est soumis.

4.2. Le bouillonnement qui a marqué la naissance et le développement prodigieux du chemin de fer au XIXe siècle a entraîné une floraison de profils : plusieurs centaines. Or, 20 000 tonnes d'acier au moins de production sont nécessaires pour amortir un cylindre de laminoir. L'aspiration à une standardisation nécessaire se fit jour dès la fin du siècle aux USA. L'American Society of Civil Engineers (ASCE) établit un catalogue de profils qu'utilisèrent la plupart des réseaux américains : ces profils ''square'' (la hauteur était égale à la largeur du patin) allant de 5 en 5 livres entre 40 et 100, à l'exception de 95. La répartition de matière était de 37 % dans le patin, 21 % dans l'âme et 42 % dans le champignon. Mais, l'usure et de nombreuses ruptures engagèrent l'AREA (American Railway Engineering Association) vers une double série de profils standard, les uns à haut niveau d'inertie vertical pour les lignes parcourues à vitesse élevée, les autres à champignon épais pour résister à l'usure due aux trafics lourds et aux essieux chargés.

En 1915, les profils standard étaient de 100, 110 (remplacés ensuite par 112 et 115), 120, 130 (puis 131, 132, 133), 140 et 150 livres par yard. Néanmoins, la Colorado Iron produisait des 106, 119 et 136 livres, certains réseaux gardant également leurs profils respectifs.

Aujourd'hui, l'AREA recommande les profils de 90, 100, 115, 119, 132, 136 et 140 livres par yard.

Les réseaux européens suivirent une évolution analogue, mais, là encore, les particularismes locaux multiplièrent les profils dans chaque pays. C'est ainsi qu'en France, le réseau de l'Est développa un rail de 46 kg, le Nord de 45 kg, l'Ouest de 42 kg et 46 kg DC, le Sud-

Ouest 42 et 44 kg DC, le Sud-Est de 48 kg, puis, il y cinquante ans, un rail remarquable de 62 kg.

Les réseaux s'accordèrent néanmoins, vers 1935, sur deux profils standard de 46 et 50 kg, qui se sont alors largement développés. Tous les réseaux européens adoptèrent des positions analogues, donc des profils normalisés de 45 à 50 kg/m (par ex. 49 kg en Allemagne). Ceci facilita, dans le cadre de l'UIC (l'Union Internationale des Chemins de fer) créée en 1922, une standardisation à l'échelle internationale de profils de 54, 60 kg, et 71 kg, dont le plus répandu, le 60 kg, s'est largement développé dans le monde.

Outre ces profils, l'UIC a standardisé des profils plus faibles pour certains réseaux, souvent à voie métrique et à faible charge par essieu (40, 45 et 50 kg).

Il faut enfin mentionner les profils British Standard (BS) largement répandus dans le monde anglo-saxon, et les profils russes, inspirés des profils lourds américains (de 50 à 75 kg/mètre). La figure 6 et le tableau 1 donnent les caractéristiques d'ensemble d'un certain nombre de profils utilisés dans le monde.

4.3. Nous ne saurions trop insister, dès ces généralités, sur l'aspect économique des problèmes soulevés par le rail. Le choix initial d'un réseau est fondamental, car le type du profil entraîne les caractéristiques des attaches, des traverses, et des éventuelles semelles. La situation est alors figée pour la durée de vie du rail, soit en général de 20 à 30 ans, ce qui est d'ailleurs caractéristique de la plupart des gros investissements ferroviaires. Une étude économique prenant en compte les divers paramètres en cause est indispensable. Le type de rail est en effet fonction de la charge par essieu, du volume du trafic, de la vitesse, du type des véhicules, du tracé, des rampes et pentes, du type de pose, etc. Il est évidemment impossible de traduire en chiffres tous ces paramètres, mais on peut souvent apprécier l'incidence de certains choix : par exemple, le gain sur la durée de vie d'un rail en courbe de rayon faible ou moyen, est sans commune mesure avec le supplément de prix réclamé par les producteurs pour un rail dur, ou extra dur : 10 à 20 % de plus à comparer avec une vie doublée ou triplée. Mais, le plus souvent, la décision à prendre est plus difficile, et nécessite non des mathématiques, mais du flair et de l'expérience.

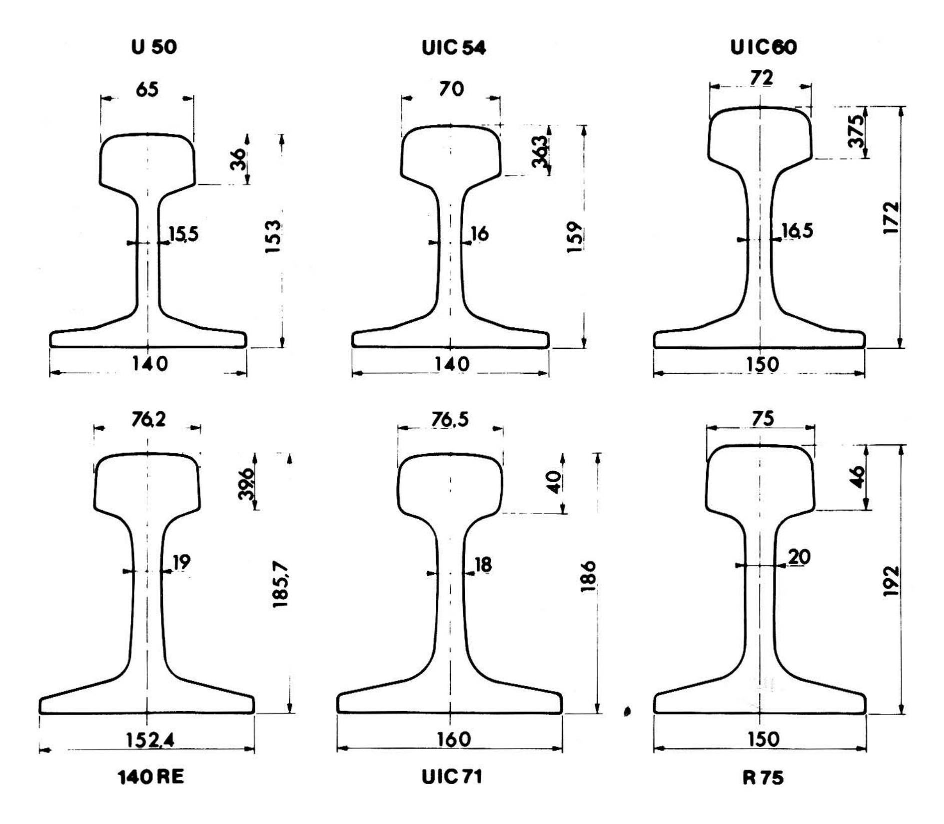


Fig. 6. — *Profils de rails usuels*

Mais un rail, comme une attache, une fois posé, ne doit pas être du type ''fit and forget'', mais ''forget me not''. Une maintenance constante et patiente du rail, comme du reste de l'ensemble de la superstructure, est un gage certain d'une exploitation économique, et cette maintenance est d'autant plus payante qu'elle est préventive et non curative. Les désordres d'une voie mal entretenue croissent de façon exponentielle. Chacun sait qu'un incendie éteint dès le début évite des ravages irrémédiables. Il en est de même pour la voie, et il est permis de penser que la qualité technique d'un réseau se mesure par la qualité et l'organisation de sa maintenance.

Les accidents causés par rupture de rails sont souvent très graves. Ils sont en tout cas très onéreux par les dégâts qu'ils occasionnent, les retards considérables qui en résultent pour l'ensemble des circulations intéressées et la fâcheuse publicité qui en est faite par les

média. Les ruptures sans déraillement perturbent lourdement les circulations et préoccupent toujours les directions générales des réseaux.

Ceux qui, ces dernières années, ont su maîtriser en accord avec les fournisseurs la fabrication des rails et qui ont développé la maintenance préventive (surveillance, contrôle, meulage) en ont tiré le plus grand bénéfice, direct par les économies annuelles réalisées, et indirect par l'amélioration sensible de la qualité du service.

Nous aurons l'occasion de revenir en détail sur ces points fondamentaux en parlant des problèmes de traitement et de réparation en voie, d'auscultations diverses, et de reconditionnement en atelier.

TABLEAU 1

Profil	Unité	S 49	U50	UIC 54	BS 113	115 RE	UIC 60	R 65	132 RE	140 RE	UIC 71	R 75
Surface	mm²	6 290	6 482	6 930	7 185	7 258	7 686	8 265	8 355	8 840	9 079	9 506
Poids	kg	49,4	50,8	54,4	56,4	56,95	60,34	64,72	65,58	69,4	71,27	74,62
Ix	cm⁴	1 819	2 023	2 346	2 352	2 730	3 055	3 540	3 671	4 029	4 152	4 490
Iy	cm⁴	320	399	418	417		513	564	600	661	735	665
It	cm⁴	162		146			172			222		
Wt	cm³	240	248,80	279	280	295	335	358	369	406	403	432
Wp	cm³	248	282,1	313	314	360	377	430	452	474	500	509
H	cm	149	153	159	158,8	168,2	172	180	181	185,7	186	192
L Patin	cm	125	140	140	139,7	139,7	150	150	152,4	152,4	160	150
I/S	cm²	28,92	31,21	33,85	32,42	37,61	39,70	42,83	43,94	45,29	45,73	47,23

RÉSUMÉ DU CHAPITRE 1

Le rail est l'un des éléments de la superstructure ferroviaire qui joue un rôle de sécurité fondamental ; il doit être conçu comme tel. Mais l'aspect économique est également très important puisque l'ordre de grandeur de la valeur des rails posés en voie dans le monde est de 30 milliards de US $.

Utilisé dès le seizième siècle sous une forme primitive, en bois, le rail n'a véritablement commencé à évoluer qu'à partir de la naissance du chemin de fer, vers l'année 1830. Le fer, puis l'acier se sont substitués au bois et à la fonte, des traverses ont remplacé les dés de pierre d'origine. De nombreuses tentatives de profils en travers très divers du rail se sont soldées par des échecs, tandis que le poids par mètre et la longueur du rail élémentaire augmentaient progressivement. Vers 1870, à la suite de l'apparition des procédés Bessemer, Thomas & Martin, l'acier a pris la succession du fer et le rail a trouvé sa forme définitive, celle du profil Vignole, bien que le profil à double champignon ait survécu jusqu'à la deuxième guerre mondiale.

De 1900 à nos jours, le poids métrique du rail est passé de 40 à 60 et même 75 kg/m et la résistance à la rupture de 600 à 900 et 1 200 daN/mm^2 ; on lamine directement des rails de 36 m de longueur et la pose en voie se fait presque systématiquement en longs rails soudés de longueur quelconque. La difficulté fondamentale de l'élaboration du rail provient des nombreuses qualités qu'il requiert et qui sont malheureusement très souvent contradictoires. La standardisation joue un grand rôle dans les conditions de fabrication et il convient de noter tout particulièrement celle qui est prescrite par l'Union Internationale des Chemins de Fer (UIC).

2 LA DYNAMIQUE VOIE-VÉHICULE

Nous nous limiterons dans ce chapitre à l'aspect de la dynamique ayant une incidence sur les efforts supportés par le rail. Il ne s'agit donc pas d'un examen exhaustif du problème qui a fait ces dernières années l'objet de nombreuses recherches, surtout dans le but de concevoir une voie apte à la circulation aux très grandes vitesses.

1. Généralités

La voie est constituée par un ensemble d'éléments d'élasticité et amortissement différents qui transmettent à la plateforme, elle-même déformable, la charge dynamique des roues.

La voie classique comporte deux rails dont l'inclinaison et l'écartement sont maintenus par des traverses reposant sur une épaisseur variable de ballast, séparée de la plateforme naturelle par une sous-couche en graves de bonne qualité. De nombreux essais de substitution d'autres constituants n'ont jamais révélé de supériorité sur la voie classique, que ce soit la pose sur dalle ou sur longrines, tout au moins jusqu'aux vitesses atteintes jusqu'alors (380 km/h en février 1981 par la SNCF).

La voie supporte des efforts verticaux, transversaux et longitudinaux. L'étude de la transmission de ces efforts dans la chaîne des éléments

constitutifs de la voie ne peut être complètement appréhendée par le calcul ; des simplifications sont nécessaires car les phénomènes sont complexes et rarement élastiques ; les deux extrémités de la chaîne, le contact rail-roue et celui du ballast avec la plateforme, ne sont pas encore totalement explorés.

Même en se limitant au domaine élastique, les sollicitations verticales sont plus accessibles par le calcul que les sollicitations horizontales ; pour l'étude de celles-ci, il faut tenir compte des phénomènes de torsion du rail et des traverses dus à l'excentrement du (ou des) point(s) d'application des efforts, ainsi que des moments d'encastrement rails/traverses. Le caractère tridimensionnel de ces déformations ne peut être abusivement simplifié.

Avec toutes les réserves qu'elle comporte, l'étude effectuée dans une hypothèse élastique permet cependant de mieux comprendre les mécanismes et en particulier de saisir l'influence relative des caractéristiques mécaniques des divers éléments constitutifs de la voie et par conséquent d'orienter le choix. Mais les études expérimentales à la fois en site réel et en laboratoire, qui sont complémentaires, restent indispensables. En voie, on mesurera les efforts exercés par le biais de jauges de contraintes collées sur le rail ; la déformation d'ensemble du rail (flexion, torsion) restant toujours élastique, ceci n'appelle aucune réserve. En laboratoire on étudiera l'évolution des déformations résiduelles et la tenue à la fatigue sous des efforts ondulés connus reproduisant le mieux possible les efforts réels.

Mais l'ingénieur de la voie ne peut se cantonner à l'étude de celle-ci sous des forces données ; il doit, en étroite collaboration avec son collègue du matériel roulant, analyser comment naissent les efforts "dynamiques". C'est tout le domaine très vaste des interactions véhicule/voie dont l'investigation au cours des deux dernières décennies a fait des progrès considérables.

Les efforts dynamiques exercés par les roues peuvent varier considérablement autour de la valeur de la charge statique en vertical et de zéro ou de la valeur quasi statique (force centrifuge) en transversal. Ces variations résultent des défauts géométriques de la voie, de ceux des roues, des asymétries diverses et de toutes les caractéristiques mécaniques de la voie et du véhicule considérés (répartition des masses, élasticité et amortissement des éléments de liaison, etc).

On se trouve en présence d'un ensemble de phénomènes vibratoires, très complexes. Bien qu'il s'agisse évidemment de phénomènes déterministes, on a pu appliquer avec succès la théorie des vibrations

aléatoires, tout en attachant, bien sûr, une attention particulière à certaines fréquences qui caractérisent la voie ou le véhicule.

Les très nombreuses mesures effectuées en voie ont permis de perfectionner progressivement les modèles théoriques nécessairement simplifiés et de les caler dans chaque cas. Comme dans l'étude de la transmission des efforts dans la voie, les phénomènes d'oscillations verticales sont plus faciles à appréhender que les oscillations horizontales. Cela est dû pour une part au couplage "serré" de la roue et du rail en vertical alors que ce couplage est "lache" en transversal du fait du jeu des roues dans la voie.

2. Efforts statiques supportés par la voie

2.1. Masse par essieu

En fonction des caractéristiques propres à chaque réseau (masse du rail, espacement des traverses, résistance des ponts-rails), les voies européennes sont classées en trois catégories par l'UIC (1) pour l'acceptation des wagons de marchandises :

A : 16 t par essieu
B : 18 t par essieu
C : 20 t par essieu.

Ces trois catégories sont elles-mêmes décomposées chacune en trois sous-groupes d'indices 2, 3 et 4, caractérisant la charge répartie au mètre linéaire qui intéresse essentiellement le calcul des ouvrages d'art :

Sous-catégorie 2 = 6,4 t/m
Sous-catégorie 3 = 7,2 t/m
Sous-catégorie 4 = 8,0 t/m

La plupart des lignes des réseaux européens sont classées en catégorie C4.

(1) U.I.C. : Union Internationale des Chemins de Fer.

Des raisons d'ordre économique poussent, en trafic marchandises, à l'augmentation de la charge admise par essieu, et des études sont en cours, dans le cadre de l'U.I.C., pour accepter sur les réseaux européens des charges par essieu de 22,5 t. Il s'agit de définir dans un premier temps les limitations de vitesse et éventuellement de tonnage annuel admissible pour autoriser de tels essieux de wagons de marchandises sur des lignes anciennes dont ni l'infrastructure (ponts-rails métalliques anciens notamment), ni la superstructure (rail relativement léger, faible densité de traverses sur les petites lignes) n'ont été conçues dans cette optique. Déjà, des programmes de renforcement d'ouvrages d'art notamment sont entrepris. Dès maintenant sur les lignes importantes, on accepte pour les locomotives, beaucoup moins nombreuses que les wagons, des charges par essieu allant jusqu'à 22 t.

D'autres réseaux admettent des charges supérieures : 25 à 32 t aux U.S.A., de l'ordre de 22 t en U.R.S.S. Plusieurs chemins de fer minéraliers ont des charges comprises entre 25 et 30 t par essieu (exceptionnellement 35 t). Par contre, au Japon, en voie métrique, les charges n'atteignent que 15 à 16 t.

Pour un réseau à rénover assurant un trafic non spécialisé, une valeur maximale de 25 t par essieu paraît être un objectif assurant un bon compromis entre économies d'exploitation et dépenses supplémentaires d'entretien. Par contre, dans le cas de lignes très particulières, transport de minerai par exemple, où la vitesse n'est jamais élevée, l'étude économique globale peut conduire à accepter des charges par essieu plus élevées, l'augmentation de la cadence de remplacement des rails, des attaches, de correction de la géométrie de la voie, n'étant qu'un facteur à prendre en compte parmi d'autres. A la vérité, les études économiques de ce type sont loin d'être inattaquables, les règles que l'on utilise pour chiffrer la fatigue, et par suite les dépenses de maintenance, étant encore très imparfaites.

2.2. Interactions véhicule - voie

Il existe ente voie et véhicules des interactions dynamiques très étroites puisque les véhicules exercent des efforts dynamiques sur la voie et que les imperfections de celle-ci entraînent une accentuation des mouvements parasites des véhicules et des efforts qui en découlent. C'est donc l'ensemble qu'il convient d'étudier.

Comme rappelé ci-dessus, les sollicitations auxquelles les rails sont soumis comprennent les charges verticales et horizontales, ainsi que les efforts tangentiels qui se développent au contact rail/roue, importants lors des démarrages et freinages. Nous étudierons donc successivement ces différents points.

3. Caractéristiques d'ensemble de la voie

3.1. On caractérise l'élasticité verticale de la voie sous charge à l'aide des paramètres suivants :

a) Module de voie K

$$K = \frac{r}{z}$$

z étant l'enfoncement correspondant à une charge r uniformément répartie sur un rail.

b) Coefficient de réaction de traverse ϱ

$$\varrho = \frac{R}{z}$$

z étant l'enfoncement correspondant à la réaction verticale R d'une traverse par file de rail.

En désignant par ℓ la distance entre deux traverses consécutives, on relie ϱ et K par la relation suivante :

$$\varrho = \frac{R}{z} = R\frac{K}{r} = \ell r\frac{K}{r} = K\ell$$

c) Coefficient de ballast C

$$C = \frac{\varrho}{S} = \frac{R}{zS} = \frac{p}{z}$$

p étant la pression moyenne exercée sur la surface S d'appui de la traverse.

C'est une notion purement conventionnelle qui n'a pas de signification physique.

3.2. En fait, la voie est constituée par une chaîne de matériaux ayant chacun leur élasticité propre (plateforme, ballast, traverse, semelle, rails, ...).

Si ϱ_n est le coefficient d'élasticité d'un de ces éléments, on a par définition :

$$\varrho_n = \frac{R}{z_n} \quad \text{donc } z = \Sigma z_n = \Sigma \frac{R}{\varrho_n} = R\Sigma \frac{1}{\varrho_n}$$

d'où :

$$\frac{1}{\varrho} = \Sigma \frac{1}{\varrho_n}$$

Voici quelques valeurs des coefficients ϱ :

—	âme du rail	de	5 000	à	10 000.10⁴ N/mm
—	traverses bois	de	50	à	80.10⁴ N/mm
—	traverses béton	de	1 200	à	1 500.10⁴ N/mm
—	ballast bourré	de	10	à	30.10⁴ N/mm
—	semelle caoutchouc	de	10	à	20.10⁴ N/mm

Sur lignes anciennes, où en général il n'existe pas de sous-couche en matériaux granulaires, ce sont essentiellement le ballast et la plateforme qui conditionnent l'ensemble de l'élasticité et le coefficient de réaction global ϱ, déduit de la formule ci-dessus, peut varier entre 0,50 et 10.10^4 N/mm suivant la nature du ballast et de la plateforme, les valeurs courantes étant de l'ordre de 3.10^4 N/mm par tête de traverse :

—	ballast et sol gelé	de	8	à	10.10^4 N/mm
—	plateforme rocheuse	de	3	à	8.10^4 N/mm
—	plateforme graveleuse	de	2	à	6.10^4 N/mm
—	plateforme argileuse	de	1,5	à	2.10^4 N/mm
—	plateforme marécageuse	de	0,5	à	$1,5.10^4$ N/mm

En fait, tous les essais et études récemment faits sur cette question montrent le rôle fondamental joué par les épaisseurs de sous-couches en graves et de ballast dans la stabilité des plateformes ferroviaires. La mise en place d'épaisseurs convenables de ces deux matériaux suivant la nature de la plateforme permet de resserrer la fourchette des valeurs.

4. Efforts statiques verticaux

4.1. *Le calcul statique*

Bien qu'éloignée de la réalité physique des phénomènes, l'étude statique donne une idée suffisante de l'influence des divers facteurs et permet d'aborder le problème des contraintes de flexion du rail, la déformation du rail restant normalement élastique (c'est-à-dire en dehors des cas qui conduiraient à un déraillement).

Cette étude a été initialement menée par Zimmermann (figure 7).

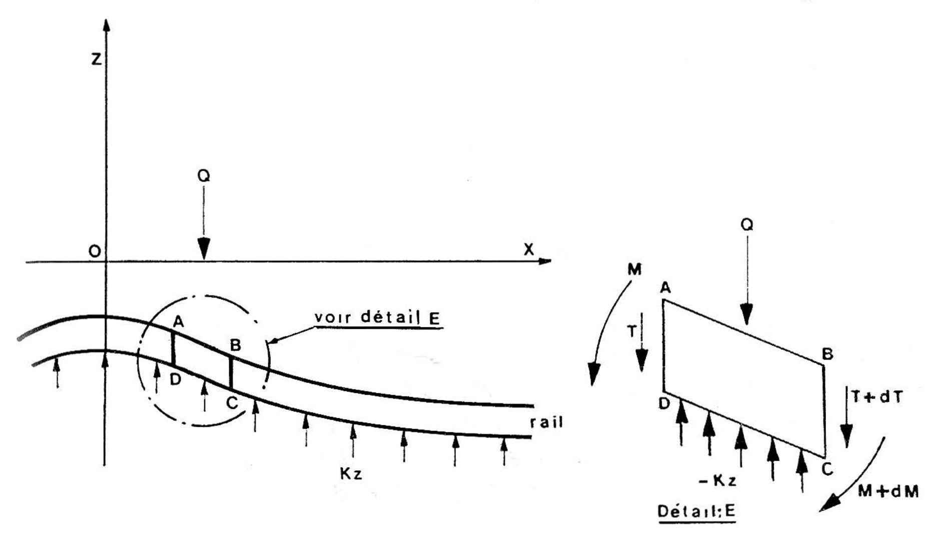


Fig. 7. — *Équation de ZIMMERMANN*

Elle suppose un rail de longueur infinie (2) reposant sur un support continu horizontal, de module de voie K constant, supportant une charge concentrée Q immobile. Nous appellerons :

- M le moment fléchissant du rail
- T l'effort tranchant du rail
- K le module de voie
- E le module d'Young de l'acier
- I l'inertie verticale du rail.

(2) La pose en longs rails soudés vérifie sensiblement cette hypothèse.

Si l'on fait abstraction des forces d'origine thermique dues à la dilatation contrariée, l'équilibre d'un élément de voie de longueur dx entraîne :

$$\frac{dM}{dx} = T \qquad (1)$$

$$\frac{dT}{dx} = Kz + Q\,\delta\,(x) \qquad (2)$$

δ (x) étant la fonction de Dirac (3) ce qui signifie qu'il n'y a qu'une seule charge Q appliquée au point x = 0.

Par ailleurs :

$$\frac{d^2z}{dx^2} = -\frac{M}{EI} \qquad (3)$$

on déduit de (1), (2) et (3) l'équation de Zimmermann :

$$EI\,\frac{d^4z}{dx^4} + Kz = -\,Q\,\delta\,(x)$$

Si l'on désigne par Z (ω) la transformée de Fourier de z, on obtient en posant $\frac{K}{EI} = w^4$:

$$\omega^4\,Z + w^4\,Z = -\frac{Q}{EI}$$

$$Z = -\frac{Q}{EI\,(\omega^4 + w^4)}$$

Par transformation inverse de Fourier (4), on obtient z :

pour $x \geqslant 0$ $\qquad z = z_0\sqrt{2}\,e^{-\frac{wx}{\sqrt{2}}}\cos\left(\frac{wx}{\sqrt{2}} - \frac{\Pi}{4}\right)$

(3) La fonction de Dirac δ (t) est telle que δ (t) = 0 si t $\neq$ 0 δ (t) = ∞ si t = 0 et $\int_{-\infty}^{+\infty} \delta\,(t)\,dt = 1$.

(4) Le principe de la transformation de Fourier est rappelé en 6.1.

pour $x \leqslant 0$ $$z = z_0 \sqrt{2}\, e^{-\frac{wx}{\sqrt{2}}} \cos \left(\frac{wx}{\sqrt{2}} + \frac{\Pi}{4}\right)$$

avec : $$z_{max} = z_0 = \frac{Q}{2\sqrt{2}\sqrt[4]{EIK^3}}$$

L'élasticité verticale de la voie est définie par le rapport

$h = \frac{Q}{z_0} = 2\sqrt{2}\sqrt[4]{EIK^3}$; ce paramètre traduit l'élasticité de l'ensemble de la voie, plateforme comprise, sous un effort vertical donné.

La figure 8 donne les tracés symétriques par rapport à l'axe des z qui en découlent pour M, T et Z.

Toutes ces courbes sont des sinusoïdes amorties de même longueur d'onde :

$$\lambda = 2\sqrt{2}\,\frac{\Pi}{w}$$

dont les amplitudes diminuent rapidement avec un rapport de réduction, d'une onde à la suivante, de :

$$e^{-\Pi} = 0{,}0432$$

Le soulèvement maximal est :

$$z_e = -\,z_0\, e^{-\Pi} = -\,0{,}0432\, z_0$$

z_0 étant de l'ordre du mm, ce soulèvement ne dépasse pas quelques centièmes de mm. Le poids de la voie lui-même évite normalement tout décollement (5).

Par ailleurs, on peut constater que pour $x > \frac{\lambda}{2}$, M et T sont pratiquement nuls ; l'influence de la charge Q ne se fait donc sentir que sur une longueur d'onde comprise entre 4 et 8 m.

L'intérêt principal de cette étude réside dans la considération des diverses valeurs maximales obtenues pour le moment fléchissant et l'effort

(5) Toutefois ce léger soulèvement entraîne une diminution de la résistance transversale de la voie qui peut favoriser une déformation lorsque les rails sont en compression en été et si la compacité du ballast a été altérée.

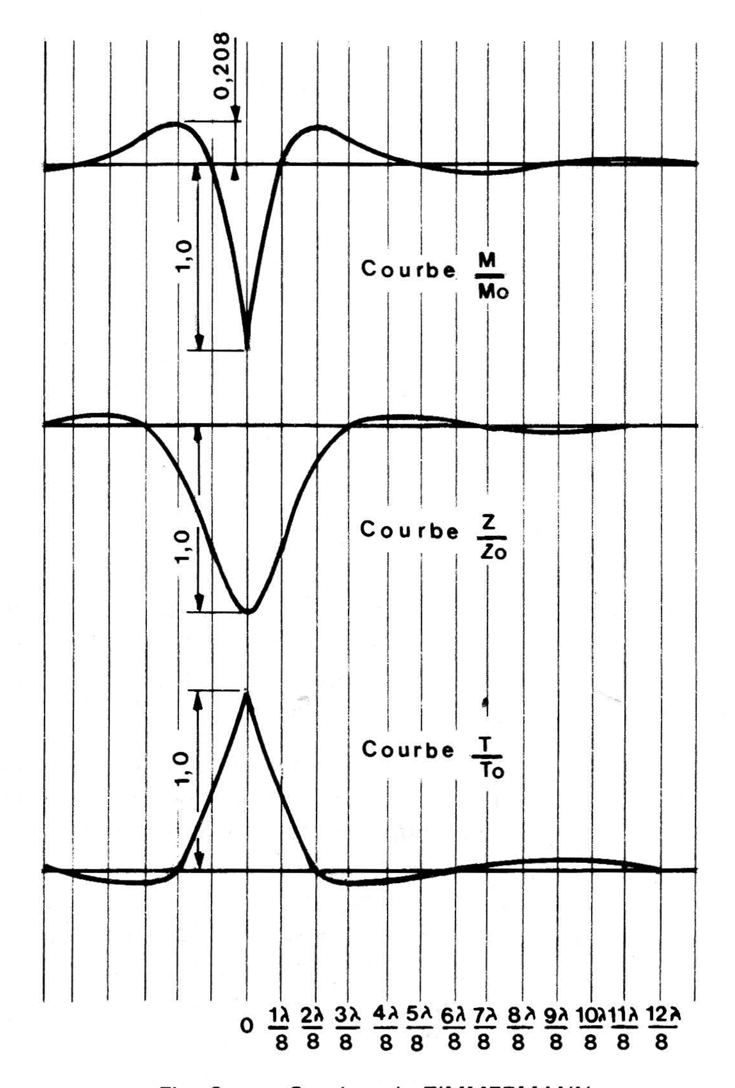


Fig. 8. — *Courbes de ZIMMERMANN*

tranchant, car elle donne des indications intéressantes sur l'influence des principaux paramètres sur le comportement de la voie :

$$M_{max} = \frac{Q}{2\sqrt{2}} \sqrt[4]{\frac{EI\ell}{\varrho}}$$

$$R_{max} = \frac{Q}{2\sqrt{2}} \sqrt[4]{\frac{\ell^3\varrho}{EI}}$$

$$Z_{max} = \frac{Q}{2\sqrt{2}} \sqrt[4]{\frac{\ell^3}{EI\varrho^3}}$$

$$h = \frac{Q}{Z_{max}} = 2\sqrt{2} \sqrt[4]{\frac{EI\varrho^3}{\ell^3}}$$

En particulier, lorsque l'inertie du rail I augmente, c'est-à-dire lorsqu'on augmente le poids métrique du rail, M augmente mais Z et R diminuent et la contrainte de flexion σ diminue rapidement car :

$$\sigma_{max} = M \frac{V}{I} = \frac{Qv}{2\sqrt{2}} = \sqrt[4]{\frac{E\ell}{I^3\varrho}}$$

$\frac{I}{V}$ étant le module de résistance vertical.

L'augmentation de l'inertie du rail a plus d'intérêt pour diminuer les contraintes de rail que pour améliorer la tenue du nivellement. C'est ce que les ingénieurs ont empiriquement découvert au fur et à mesure de l'augmentation des charges par essieu.

Les résultats obtenus peuvent toutefois être modifiés par le phénomène de la ''danse'' : une traverse danseuse, accrochée au rail par ses attaches, ne repose plus sur son moule de ballast sur lequel elle est brutalement appliquée au passage des charges. L'application des formules statiques n'est qu'une approximation grossière, mais elle montre cependant que, si ℓ double, σ est multiplié par $\sqrt[4]{2} = 1,2$ et z par $2^{3/4} = 1,7$. On ne tarde pas à sortir du domaine élastique, la détérioration de l'appui de ballast s'aggrave ainsi très rapidement, et la contrainte dans le rail est sérieusement majorée.

Pour une voie en rail U 50 (6), sur une plateforme moyenne, sous une roue de 10 t, σ passe de 8,2 à 9,8 daN/mm² et l'enfoncement de 1,9 à 3,2 mm. Une danse de 3 mm majore donc les contraintes statiques de 20 %. Mais les enfoncements des traverses porteuses encadrantes augmentent sensiblement, d'où altération rapide du nivellement.

---

(6) Profil du rail français de masse 50 kg/m.

4.2. Application numérique du calcul statique

Le tableau 2 donne le résultat des calculs faits pour une voie armée en rail U 50, avec traverses en bois espacées de $\ell = 0,60$ m, charge de roue Q = 10 tonnes :

		Plateforme		
		médiocre	moyenne	bonne
C	(daN/cm³)	3	9	18
ϱ	(10^4 N/mm)	0,58	1,73	3,46
k	(10^4 N/m²)	960	2 880	5 760
σ_{max}	(daN/mm²)	10,6	8,1	6,9
Z_{max}	(mm)	4,6	1,8	1,12
R_{max}	(10^4 N)	2,6	3,1	3,8
x_0	(m)	0,89	0,67	0,57
$x_1 = 3\, x_0$		2,67	2,01	1,71
h	(10^4 N/mm)	2,17	5,56	9,09

TABLEAU 2

On voit que lorsque le coefficient de ballast varie dans la proportion de 1 à 3 et à 6 :

σ diminue dans la proportion de 1 à 0,75 et à 0,65
z diminue dans une proportion plus importante de 1 à 0,40 et à 0,24

Lorsque l'on passe du rail de 50 kg au rail de 60 kg, I augmente de 2 019 cm⁴ à 3 055 cm⁴ et v de 71,7 à 80,95 mm ; σ est multiplié par 0,82 et Z par 0,90.

Lorsque	ℓ passe de 0,60 m à	0,70 m,	0,80 m et	0,90 m
	σ est multiplié par	1,04	1,07	1,10
mais	Z est multiplié par	1,12	1,22	1,33

4.3. Discontinuité des appuis

Le calcul complet de l'influence de la discontinuité des appuis fait par Hutter (Université de Munich 1955) n'apporte que de faibles modifications aux résultats de la théorie simplifiée précédente, par conséquent négligeables vis-à-vis de l'influence des surcharges dynamiques. La forme générale des diverses courbes est conservée et les efforts calculés dans le rail sont pratiquement identiques.

4.4. Études dynamiques

On prend en compte ici la masse de la voie et ses caractéristiques rhéologiques, mais on suppose qu'elle ne présente pas de défaut géométrique.

Si l'on admet pour simplifier les calculs que l'amortissement de la voie dans son mouvement vertical est du type visqueux, l'équation du mouvement s'écrit :

$$(EI - \mu I V^2) \frac{\partial^4 Z}{\partial x^4} + m \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} + k' \frac{\partial z}{\partial t} + kz = Q\ (x,t)\ \delta\ (x)$$

Q (x,t) : charge verticale
δ (x) : fonction impulsionnelle de Dirac
k : module de voie
k' : viscance de la voie
m : masse linéique de la voie en mouvement y compris une part fictive non négligeable du ballast et de la plateforme
μ : masse spécifique de l'acier ; le terme $\mu I V^2 \dfrac{\partial^4 z}{\partial x^4}$ est le couple d'inertie du rail dû à la rotation de sa section, la charge Q se déplaçant à la vitesse V.

Cette équation n'est soluble littéralement que dans quelques cas simples : Q constant en particulier. Encore faut-il déterminer par des mesures dynamiques les 2 coefficients m et k'. Quelques simplifications permettent cependant de tirer des enseignements intéressants. En négligeant le terme $\mu I V^2$ et la viscance k', l'équation sans second

membre se résoud facilement et permet de calculer la vitesse de propagation de l'onde de flexion :

$$V_0 = \left(\frac{4kEI}{m^2} \right)^{1/4}$$

En réalité c'est en mesurant cette vitesse à partir d'un choc sur la voie que l'on calcule indirectement la valeur de m.

Ainsi, pour la voie lourde du TGV (rail UIC 60, traverses en béton, forte épaisseur de ballast), la fréquence propre de la voie $f_0 = 2\Pi \sqrt{\frac{k}{m}}$ est voisine de 40 Hz et la vitesse propagatoire de l'onde voisine de 200 m/sec. La masse m à prendre en compte ressort à 870 kg/m de rail, valeur très supérieure à celle d'un rail et d'une demi-traverse par mètre de voie.

On peut calculer aussi la raideur verticale de la voie sous une charge immobile Q :

$$h_0 = \frac{Q}{z} = \sqrt[4]{64 \; EI \; k^3}$$

puis sous une charge Q constante se déplaçant à la vitesse V :

$$h = h_0 \sqrt{1 - \frac{mV^2}{\sqrt{4 \; kEi}}}$$

Cette raideur apparente s'annule pour la vitesse V_0 indiquée ci-dessus qui peut être considérée comme la vitesse critique dont il serait dangereux de se rapprocher. Selon les mesures faites en voie lors des essais TGV 100 du record du monde de vitesse de février 1981 (vitesse atteinte 380 km/h), on a trouvé en examinant la variation de h avec la vitesse que la vitesse critique devait être de 140 m/sec, soit 500 km/h environ, valeur inférieure à celle de propagation de l'onde de flexion donnée ci-dessus. Ceci est bien expliqué par la théorie qui montre que la vitesse critique diminue lorsque la charge Q n'est pas constante mais oscille (ce qui est toujours le cas) et d'autant plus que la fréquence de cette oscillation se rapproche de la fréquence propre de la voie, ce qui se conçoit. Le fort amortissement de la voie réduit heureusement l'importance de ce phénomène (7).

M. Roland Sauvage (8) a étudié l'influence de la viscance k' de la voie

---

(7) J.-P. Fortin : "La déformée dynamique de la voie - RGCF de février 1982.
(8) Thèse de Doctorat 1961.

en supposant que l'onde de déformation du rail se déplace avec la charge à la vitesse V c'est-à-dire en faisant l'hypothèse d'une déformation stationnaire. Il a montré que :

— la longueur d'onde de la sinusoïde amortie qui représente la déformée décroît en avant de la charge et croît derrière celle-ci,
— la tangente à cette déformée n'est plus horizontale sous la charge ; par conséquent la roue monte en permanence une pente,
— la puissance absorbée par la voie est alors proportionnelle à la vitesse des circulations, aux charges de roue et à la pente de la déformée au droit du point d'application des charges.

Ces études ont été reprises par MM. Gilles Sauvage et Jean-Pierre Fortin (9) à l'occasion des marches TGV 100. Ils ont montré que, jusqu'à 380 km/h, à partir des valeurs expérimentales enregistrées, la puissance absorbée par la voie variait suivant une loi en $V^{2,25}$, la pente que la roue monte étant de 0,37 ‰ à 380 km/h.

A la vitesse commerciale du TGV : 270 km/h, la puissance nécessaire pour vaincre la "traînée de roulement" n'est que 0,14 kW/tonne, soit moins de 2 % de la puissance totale nécessaire en palier à cette vitesse (3 750 kW). Ce chiffre, très faible, et qui montre entre autres l'avantage du chemin de fer (roue en acier sur rail en acier), croît évidemment très vite lorsqu'on se rapproche de la vitesse critique.

5. Les défauts géométriques de la voie et leurs spectres

5.1. Nous venons de voir qu'il est relativement aisé de représenter par un modèle mathématique assez simple le comportement d'ensemble de la voie sous une charge unique, moyennant certes quelques simplifications, mais sans trop s'éloigner de la réalité. Ce modèle peut assez facilement s'étendre à plusieurs charges succesives pour représenter un véhicule. Mais on a supposé jusqu'alors la voie géométriquement parfaite. Or, tant les défauts de nivellement de la voie que ceux des véhicules (balourd de roue) provoquent des surcharges dyna-

(9) La traînée de roulement des véhicules de chemin de fer (RGCF juillet 1982).

miques ayant un aspect aléatoire. On sait très bien mesurer ces surcharges et l'analyse mathématique ici encore permet de mieux comprendre et surtout de saisir l'influence des divers paramètres.

Les très nombreuses mesures faites principalement en France et en Allemagne montrent que la dispersion des surcharges dynamiques croît avec la vitesse. La connaissance de cette dispersion ne suffit pas, il faut en rechercher les causes.

Étudier le comportement d'un véhicule en fonction de ses caractéristiques et de celles de la voie revient à chercher la réponse d'un système mécanique à des excitations données, de caractère périodique et aléatoire. Les défauts géométriques de la voie qui créent l'excitation peuvent être représentés par un spectre de raies, dues par exemple à des défauts de joints ou des soudures creuses (raies de 6, 9, 18 et 36 m), à l'usure ondulatoire courte ou longue des rails (comprise entre 0,06 m et 1,50 m de longueur d'onde), sur un fond de spectre continu représentant les défauts aléatoires.

5.2. Spectre spatial - spectre temporel

En matière de description de la géométrie d'une voie ferrée, l'amplitude des défauts est généralement représentée et mesurée comme une fonction de l'espace x : Z (x). Dans le cas du spectre continu on considère une densité spectrale de puissance S_{zz} (F) fonction de la fréquence spatiale F des défauts, ou de son inverse, la longueur d'onde

$$\lambda = \frac{1}{F} \cdot$$

Or, dans les applications à la dynamique du véhicule, ce même défaut de voie peut être considéré comme une excitation temporelle du véhicule qui le parcourt à la vitesse V ; à la fonction spatiale z (x) correspond alors l'excitation temporelle :

$$z\ (t) = Z\ (Vt)$$

pour laquelle on peut calculer une densité spectrale temporelle de puissance s_{zz} (f), f étant la fréquence temporelle ; on a ainsi les relations de correspondance :

	Domaine spatial	Domaine temporel
— abscisse	$x = \frac{V}{t}$	$t = \frac{X}{V}$
— fréquence	spatiale $F = \frac{f}{V}$	temporelle $f = FV$
— défaut de voie	$Z(x)$	$z(t)$
— densité spectrale	$S_{zz}(F)$	$s_{zz}(f)$

La relation entre les densités spectrales spatiales et temporelles s'établit en remarquant que, en vertu de l'égalité de Parseval, l'énergie contenue dans le signal est la même quelle que soit sa représentation ; on doit donc avoir :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} S_{zz}(F)\, dF = \int_{-\infty}^{+\infty} s_{zz}(f)\, df = \bar{\sigma}^2(t)$$

avec $dF = \frac{dF}{V}$ et σ^2 étant la variance du défaut de voie z, soit :

$$\frac{S_{zz}(F)}{V} = s_{zz}(f)$$

5.3. Les spectres des défauts aléatoires de nivellement d'une voie (figures 9 et 10) ont une forme bien définie, dont la courbe moyenne est très correctement représentée par la formule :

$$\frac{A}{(B + F)^3}$$

Ce spectre continu se déplace à peu près parallèlement à lui-même quand la voie vieillit. Ce spectre de fond en $\frac{A}{(B + F)^3}$ doit être complété par :

— un spectre à raies multiples provenant de la plateforme (position d'anciens joints), des joints et des soudures (en général 18 m et les sous-multiples provenant de la décomposition en série de Fourier puisque ces défauts ne sont pas sinusoïdaux : 9 m, 6 m, 4,50 m, etc.) ;

— un spectre de raies ($1{,}60 < \lambda < 1{,}80$ m) provenant du dressage des rails en usine par la machine à galets ;

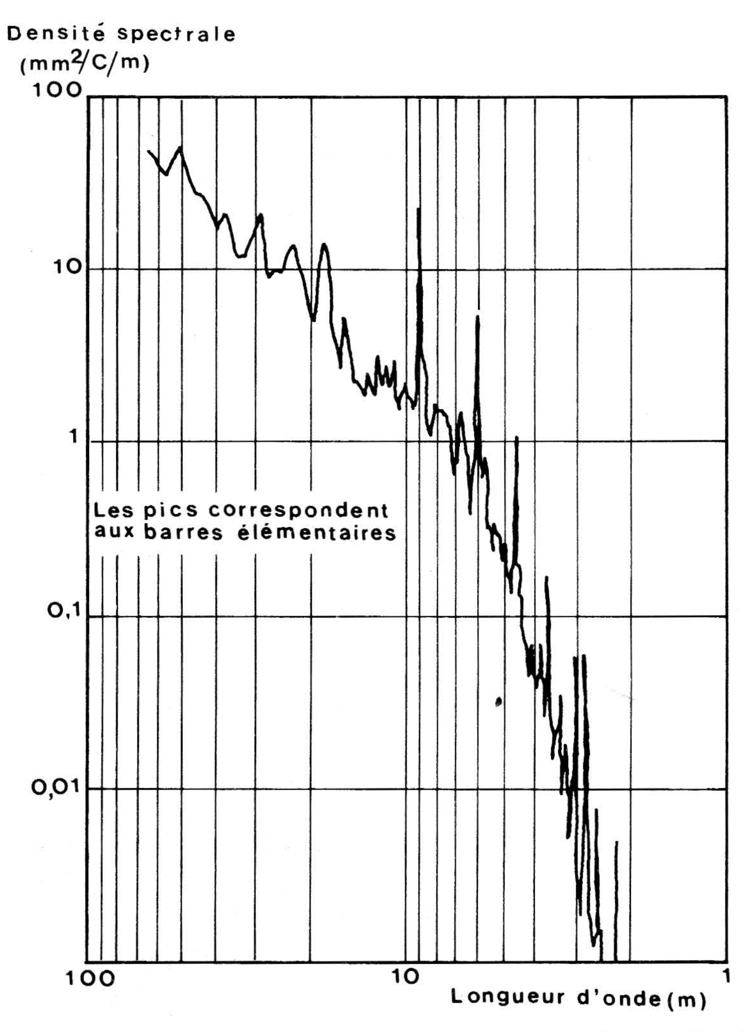


Fig. 9. — *Spectre de défauts entre 100 et 5 m de longueur d'onde*

— un spectre de raies provenant de l'usure ondulatoire, phénomène qui fait l'objet d'un chapitre particulier (0,05 < λ < 1 m).

Une analyse fine de ces spectres est particulièrement importante car le traitement préventif ou curatif de chaque domaine de raies fait appel à des techniques bien distinctes.

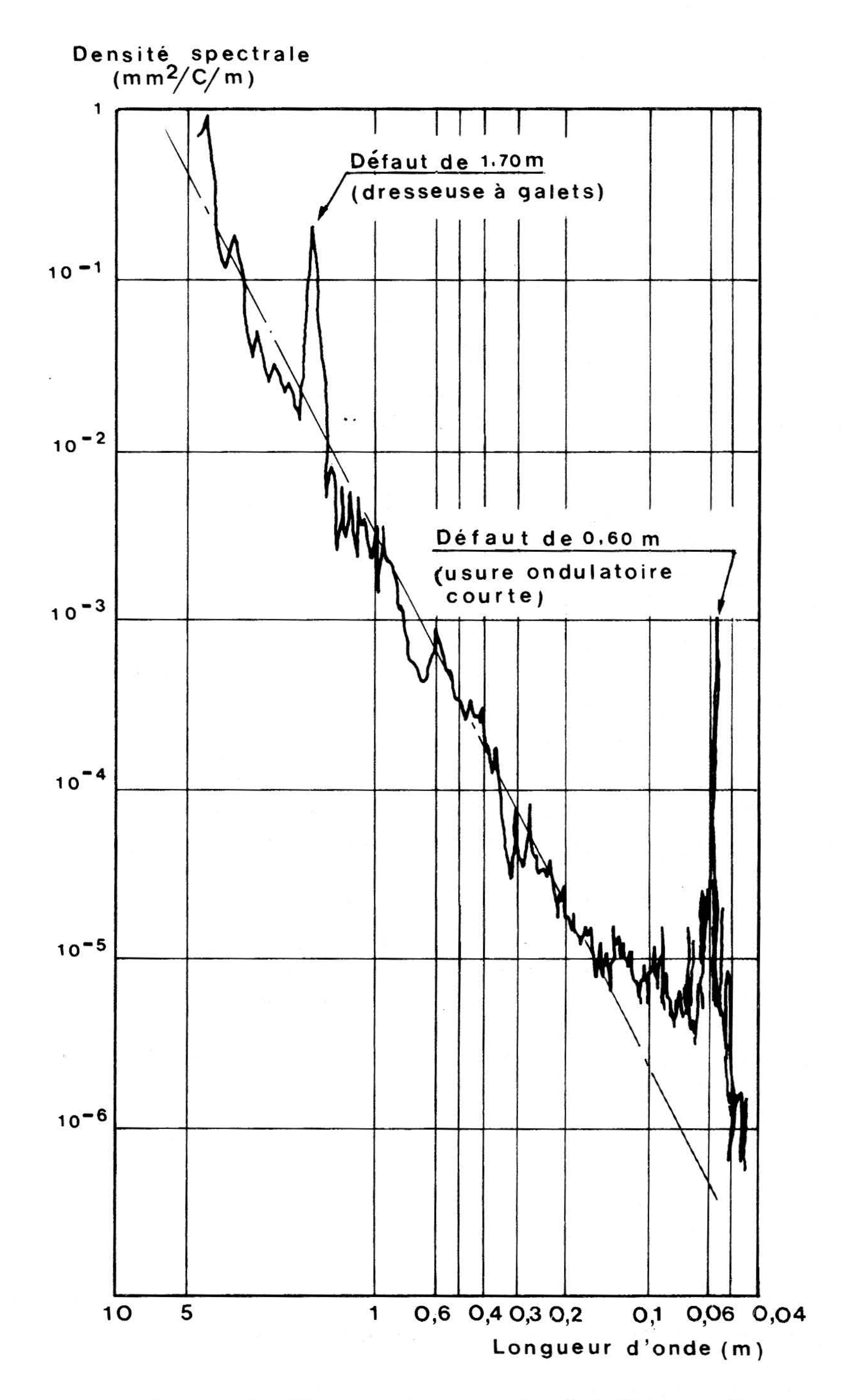


Fig. 10. — *Spectre de défauts de longueur d'onde inférieure à 5 mètres*

De l'examen des spectres relevés d'après l'enregistrement des défauts de la voie plusieurs conclusions se dégagent :

a) Sur une voie moderne récente sans joints, dont les rails ont été bien dressés et les soudures exécutées avec soin, on n'observe pratiquement, une fois corrigés les premiers tassements aléatoires, que le spectre continu.

b) Dans un laps de temps de l'ordre d'un an ou deux, entre deux interventions en nivellement, ce sont les amplitudes correspondant à des longueurs d'ondes allant de quelques mètres à quelques dizaines de mètres qui augmentent le plus vite. Dans cette bande de longueurs d'ondes, le spectre dans le diagramme bi-logarithmique se déplace à peu près parallèlement à lui-même.

c) Puis se développe progressivement un spectre de raies dû aux soudures qui restent des points singuliers car, d'une part la géométrie fine des rails adjacents présente inévitablement une discontinuité, d'autre part la soudure modifie profondément la distribution des contraintes résiduelles initiales du rail dans une section donnée. Ces contraintes vont, sous l'effet des déformations plastiques dans la zone de contact rail-roue, évoluer différemment de celles des autres sections courantes du rail, d'où des déformations résiduelles particulières (dans le cas des soudures aluminothermiques exécutées en voie, ces phénomènes se trouvent aggravés car le métal dans la zone de soudure n'a pas les mêmes propriétés mécaniques que le reste du rail).

Outre l'apparition de ces raies, le spectre de fond lui-même dans les courtes longueurs d'ondes va se détériorer en raison de l'évolution aléatoire des contraintes résiduelles au voisinage de la surface du rail, chaque point du rail étant l'objet de sollicitations dynamiques dont le niveau moyen et la distribution statistique sont différents, d'où des déformations résiduelles aléatoires du profil en long du rail qui sont évolutives tant que l'écrouissage du rail ne sera pas terminé. On conçoit qu'à cet égard un rail de profil lourd et de nuance d'acier plus dure soit moins sensible à ces phénomènes. Il en est de même pour celui que l'on appelle usure ondulatoire qui apparaît dans certaines circonstances : formation de crêtes espacées régulièrement de quelques cm (l'analyse a montré qu'il y avait sur ces crêtes apparition de martensite). Entre deux crêtes le creux se mesure en centièmes de mm mais va s'aggravant avec le trafic.

Les déformations de grandes longueurs d'ondes visées en b) ci-dessus sont corrigées par bourrage (ou soufflage) résultant de tassements aléatoires, sans déformation permanente du rail.

Les déformations permanentes de courtes longueurs d'ondes visées en c) intéressent au contraire le rail et l'on ne peut corriger les ondulations à la surface du rail que par meulage.

Quant aux défauts dus au dressage des rails en usine, ils ne peuvent aussi être corrigés en voie que par meulage des rails, mais les amplitudes se chiffrant en dixièmes de mm, ce travail est beaucoup plus coûteux et difficile. A cet égard la meilleure solution est le dressage des rails par traction envisagé depuis quelques années par les usines sidérurgiques françaises. Ce traitement résoud aussi le problème du dressage des abouts de rails et par conséquent contribue à améliorer la qualité géométrique initiale des soudures.

*

* *

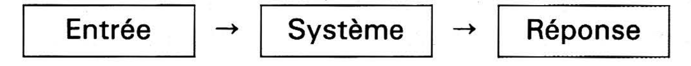
Nous venons de voir quels sont les défauts de géométrie que l'on constate en voie, qui tous naissent ou s'aggravent sous l'effet des sollicitations dynamiques que celle-ci supporte.

Nous allons maintenant examiner les mouvements des véhicules.

6. Sollicitations dynamiques de la voie

6.1. Étant donné une excitation e (t), la réponse r (t) à travers un système est en général très difficile à obtenir. En effet, même si le signal d'entrée du système peut être défini par son spectre de densité de puissance, il n'est possible de calculer la réponse à cette entrée que si le système est linéaire et invariant.

L'entrée x_i (t) produisant la sortie y_i (t), le système



est linéaire si l'entrée $\Sigma a_i x_i$ produit la sortie $\Sigma a_i y_i$.

Le système est invariant si l'entrée x (t + τ), c'est-à-dire déphasée de τ, produit la sortie y (t + τ), déphasée de la même quantité.

Dans ces conditions, il est régi par un système d'équations différentielles à coefficients constants, que l'on est précisément amené à considérer dans l'analyse harmonique du système voie-véhicule.

On montre qu'un système linéaire et invariant est complètement déterminé par la réponse qu'il donne à la fonction impulsion de Dirac δ (t). Soit g (t) la réponse à l'excitation f (t), h (t) la réponse à l'impulsion de Dirac, si F, G, H sont respectivement les transformées de Fourier (10) de f, g, t :

$$G (j\omega) = H (j\omega) . F (j\omega)$$

Cette transformée offre le double avantage de simplifier les calculs et de donner une représentation spectrale des fréquences $\left(f = \frac{\omega}{2\Pi}\right)$,

soit :

$$g (t) = \frac{1}{2\Pi} \int_{-\infty}^{+\infty} H (j\omega) . F (j\omega) e^{j\omega t} dt$$

La transformée de Fourier H (jω) de la réponse impulsionnelle s'appelle fonction de transfert ou transmittance du système.

Soit donc un signal d'entrée x (t) qui relève d'un processus aléatoire stationnaire du second ordre. On démontre que la sortie est aléatoire stationnaire du deuxième ordre et que la densité spectrale de puissance de la réponse est :

$$\Phi_{yy} (\omega) = |H (j\omega)|^2 \Phi_{zz} (\omega)$$

On en déduit la valeur quadratique moyenne de la réponse par la relation :

$$\overline{y}^2 (t) = \frac{1}{\Pi} \int_{0}^{\infty} |H (j\omega)| \Phi_{zz} (\omega) d\omega$$

qui donne directement le résultat sans nécessiter le calcul de l'original d'une transformée de Fourier.

6.2. Dans le cas général l'excitation est absolument quelconque et il est impossible de prévoir la réponse. Toutefois si cette excitation possède un double caractère de stationnarité et d'ergodicité, un échantillon de longueur limitée peut suffire à représenter l'ensemble du phénomène.

(10) Soit f (t). On appelle transformée de Fourier de f (t) la fonction F (ω) telle que F (ω) = $\int_{-\infty}^{+\infty}$ f (t) $e^{-j\omega t}$ dt avec j $= \sqrt{-1}$.

Le spectre de l'excitation $S_E(\omega)$ étant connu, on démontre que le spectre $S_R(\omega)$ de la réponse est donné par :

$$S_R(\omega) = S_E(\omega)\,|H(\omega)|^2$$

Si $S_R(\omega)$ ne permet pas de retrouver la réponse r (t) elle-même, elle permet d'en connaître les éléments statistiques, notamment la moyenne quadratique de r :

$$\sigma^2\{r(t)\} = \frac{1}{\Pi}\int_0^{+\infty} S_R(\omega)\,d\omega$$

Les fonctions de transfert considérées sont de deux sortes :

— déplacements/efforts, pour les problèmes de sécurité ou de fatigue du matériel roulant et de la voie ;

— déplacements/déplacements, pour les problèmes de confort, la réponse cherchée étant ici les mouvements ressentis par le voyageur.

Pour calculer ces fonctions, il faut définir un modèle mathématique représentant l'ensemble du véhicule et de la voie considérés. La mise en équations du système à plusieurs étages constitué par la voie et le véhicule est assez laborieuse, de même que la résolution du système d'équations de la forme $[F] = [M]\,x'' + [C]\,x' + [K]\,x$. Des simplifications sont nécessaires.

La première, dont on peut heureusement justifier le bien-fondé, c'est de séparer l'étude des mouvements verticaux et transversaux. La seconde est d'admettre pour faciliter les calculs que les liaisons sont élastiques et linéaires et que les divers amortissements sont de types visqueux. D'autres sont possibles suivant la bande de fréquence à laquelle on s'intéresse.

Ainsi, on n'altère pas profondément la représentation des phénomènes ; la confrontation permanente des résultats du calcul et des mesures permet d'ailleurs d'y veiller.

En vertical, on étudiera successivement la réponse des masses non suspendues et celle des masses suspendues des véhicules.

7. Dynamique verticale

Nous examinerons tout d'abord l'influence des excitations provoquées par les défauts de géométrie de la voie du spectre de fond, puis celle

des défauts périodiques, spectre de raies, et enfin celle des discontinuités.

7.1. Masses non suspendues

Les masses non suspendues des véhicules, c'est-à-dire les essieux et les pièces rigidement fixées sur eux, sont relativement légères : 1 100 kg par essieu pour un véhicule non moteur, 1 600 kg pour les essieux moteurs du TGV, 3 200 kg pour un essieu de locomotive. Elles ne sont sensibles qu'aux discontinuités et aux défauts de courtes longueurs d'ondes (moins de 3,00 m), la fréquence propre du système oscillant roue/voie étant de 30 à 50 Hz suivant la valeur de la masse et celle de l'élasticité verticale de la voie.

Dans ces conditions, l'excitation due au *spectre de fond* des défauts géométriques longitudinaux de la voie $\frac{A}{(B + F)^3}$ peut se simplifier en négligeant le terme constant B.

Le calcul des réponses à l'excitation du spectre de fond est relativement aisé à partir des transformées de Fourier de l'excitation et de la réponse à l'impulsion de Dirac. La forme du spectre donne une expression remarquablement simple de la valeur quadratique moyenne des surcharges dynamiques aléatoires Δq en fonction de la masse non suspendue m, de l'élasticité verticale de la voie h et de la vitesse V :

$$\sigma_{\Delta q} = k\, b\, V \sqrt{mh} \qquad (11)$$

La valeur de k caractérise l'état d'entretien des surfaces des roues et de la voie, b l'amortissement de la voie. Les surcharges sont donc proportionnelles à la vitesse et à la racine carrée de la masse non suspendue. h diminue légèrement avec la vitesse au-delà de 200 km/h (– 20 % à 300 km/h).

Il est donc essentiel que l'augmentation des vitesses s'accompagne d'une réduction correspondante des masses non suspendues et (ou)

---

(11) A. PRUD'HOMME : "La voie" - RGCF de janvier 1970.

d'une diminution de k. Le passage des locomotives BB 9200 remorquant des trains à 200 km/h au TGV à 300 km/h s'est fait sans accroître les sollicitations. En effet, l'augmentation de 50 % de la vitesse a été pratiquement compensée par une réduction de moitié des masses non suspendues. De plus, une qualité géométrique des rails améliorée a diminué le coefficient k de sorte que, au total, les surcharges dynamiques dues aux oscillations des masses non suspendues des essieux moteurs du TGV sont à 300 km/h inférieures à celles d'une locomotive classique à 200 km/h.

7.2. Masses suspendues et semi-suspendues

Pour un véhicule à bogies, on appelle ainsi respectivement la caisse et la masse du châssis de bogie au-dessus des ressorts primaires.

Le système à 2 étages est encore facile à appréhender lorsqu'on s'en tient aux mouvements verticaux. L'excitation sera cette fois celle fournie par les oscillations des essieux. On retrouvera donc dans la réponse la fréquence propre d'oscillation des essieux sur la voie (30 - 40 Hz) sous une forme atténuée, et celle correspondant aux défauts de la voie qui prendront d'autant plus d'importance, qu'à la vitesse considérée, la longueur de ces défauts induira une fréquence qui sera voisine des fréquences couplées du système bogie/caisse. La fréquence couplée basse qui intéresse plus spécifiquement la caisse est de l'ordre du hertz pour les voitures à voyageurs, plusieurs hertz pour les wagons à marchandises.

Le calcul montre que les accélérations verticales de caisse augmentent nettement moins vite que la vitesse et que l'on peut compenser cette augmentation par une diminution de la fréquence propre en vertical de la caisse, ou par une amélioration de la qualité de la voie, mais tandis qu'au-delà d'une certaine vitesse la diminution de la fréquence propre est de plus en plus efficace, l'amélioration de la qualité de la voie l'est de moins en moins (12).

---

(12) A. PRUD'HOMME : "La voie" - RGCF de janvier 1970.

Le graphique de la figure 11 représente la valeur quadratique d'accélération verticale de caisse dans le cas d'un spectre de défauts de voie de la forme $\frac{A}{(B + F)^3}$.

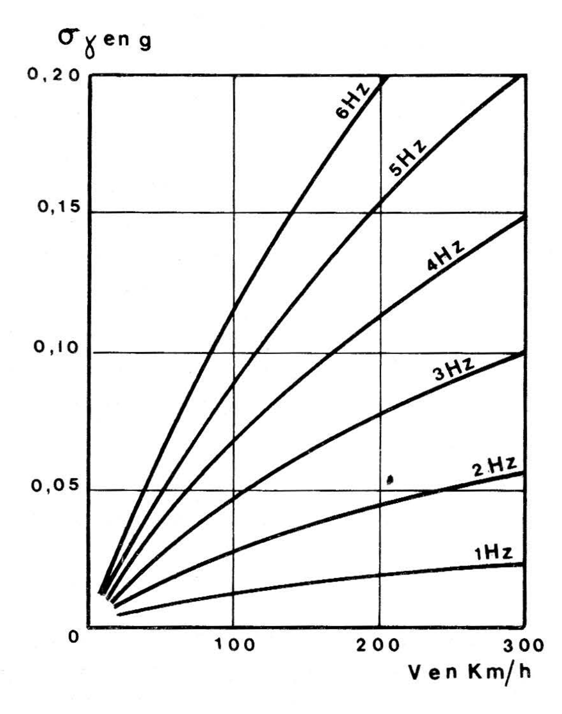


Fig. 11. — *Action des masses suspendues (accélération de caisse)*

La fréquence propre des masses semi-suspendues est plus élevée que celle de la caisse. Le mouvement essentiel est le galop de bogie dont la fréquence propre se situe entre 5 et 10 Hz. L'augmentation des accélérations avec la vitesse est plus rapide que celle des masses suspendues, mais les masses en cause sont moindres. Toutefois, à grande vitesse, un amortisseur mis en parallèle avec la suspension primaire est utile.

7.3. Les défauts géométriques de la voie à caractère périodique

Les analyses des spectres de raies permettent de définir les fréquences de résonance qui interviennent en fonction de la position des raies d'excitation, de la vitesse du véhicule et des fréquences propres de vibration des éléments intéressés (essieux ou masses non suspendues, bogies, caisses...). Elles permettent de définir en fonction des conditions de circulation les paramètres sur lesquels il convient d'agir pour éviter les résonances fâcheuses, ou tout au moins atténuer leur incidence. Les principaux défauts périodiques (usure ondulatoire courte ou longue, joints et soudures, déformations dues aux galets des dresseuses de rail en usine) ne sont généralement pas sinusoïdaux ; ils interviennent donc par leur valeur propre, mais aussi par leurs harmoniques provenant de la décomposition du défaut périodique en série de Fourier.

Le tableau 3 ci-dessous permet de déterminer les défauts sur lesquels, en fonction des vitesses pratiquées, on doit agir.

Tableau des fréquences induites en Hz

Vitesse km/h	Période en m / m/sec	Usure ondulatoire 0,06	0,12	0,25	0,60	Dressage 1,70	6	Joints et soudures 9	12	18	36
120	33	550	225	132	55	20	5	4	3	2	1
160	44	733	266	176	73	26	7	5	4	2	1
200	55	916	458	220	92	32	9	6	4	3	1
270	75	1250	625	300	125	44	12	8	6	4	2
360	100	1666	833	400	166	58	17	11	8	5	2

TABLEAU 3

Lés pavés indiquent sommairement les principales fréquences voisines des fréquences propres des éléments ci-après :

1000 Hz — Rail

30 - 50 Hz { Voie / Masses non suspendues des véhicules

15 - 20 Hz	{	Vibrations propres de caisse des véhicules
8 - 10 Hz	{	Masses semi-suspendues (châssis de bogie)
1 à 4 Hz		Masses suspendues (caisse)

Pour les joints il s'agit d'impulsions pour lesquelles l'influence de la vitesse sur les masses non suspendues est proportionnelle à celle-ci comme nous allons le voir.

7.4. Cas de discontinuités de la voie

7.4.1. Joints et soudures présentant des défauts angulaires

Dans le cas du joint, on peut simplifier le calcul en remplaçant le profil en long théorique du rail composé de deux arcs de paraboles par une discontinuité angulaire α (fig. 12).

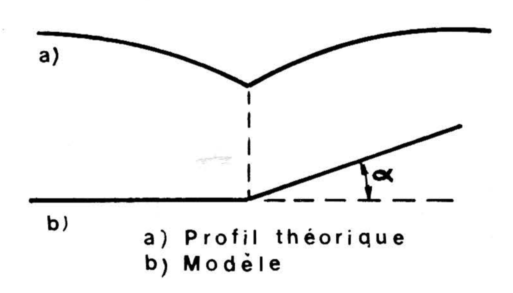


Fig. 12. — *Schématisation du joint*

Le calcul effectué dans le cas des masses non suspendues est simple. La surcharge dynamique maximale produite par une masse m est exprimée comme suit :

$$\Delta Q = \lambda\ \alpha\ V\sqrt{mh}$$

λ est fonction de l'amortissement de la voie, et diminue sensiblement lorsque celui-ci augmente.

Mais il ne faut pas tirer des déductions trop hâtives de cette formule. Nous avons à faire ici à un phénomène de choc. Quelle valeur de h faut-il prendre ? Il est bien évident qu'en raison de l'inertie du rail, des traverses et du ballast, c'est principalement la déformation au contact rail-roue qui jouera le rôle principal et dissipera l'énergie, l'élasticité globale de la voie considérée jusqu'alors interviendra d'autant moins que la voie est plus lourde (effet d'enclume).

Les Britanniques ont publié une étude théorique assez complète de ce phénomène en 1974 (13) et quelques résultats de mesures. Il ressort de cette étude que la courbe des variations de surcharges dynamiques en fonction du temps au franchissement d'un joint présente, quelques dixièmes de millisecondes après le franchissement de l'axe du joint, un pic P_1 très pointu qui résulte de la forte raideur du contact rail-roue dont nous venons de parler (fig. 13). Cette surcharge peut atteindre plusieurs fois la charge statique de roue. Un second maximum, dit P_2, beaucoup plus arrondi, apparaît sur la courbe quelques millisecondes après ; il est seul responsable du fléchissement de la voie. La surcharge correspondant à P_2 augmente avec la rigidité verticale globale de la voie, tandis que celle correspondant à P_1 en dépend très peu.

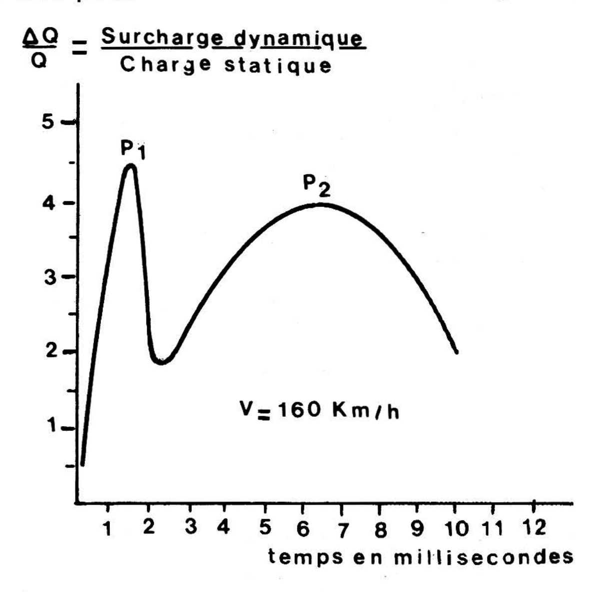


Fig. 13. — *Surcharge dynamique au franchissement d'un joint*

(13) Jenkins - Stenphenson - Clayton, Morland, Lyon : Incidence des paramètres caractéristiques de la voie et des véhicules sur les efforts dynamiques verticaux entre roue et rail. REJ n° 1 - Janvier 1974.

Côté véhicule, les masses semi-suspendues et suspendues réagissent plus tardivement et leurs oscillations n'ont donc aucune influence sur les surcharges correspondant à P_1 et P_2.

La théorie britannique confirme que les deux surcharges correspondant à P_1 et P_2 sont proportionnelles à la vitesse.

Il faut noter l'intérêt de placer les joints entre les traverses et non pas au droit des traverses, ce qui permet une certaine flexion des deux rails et un certain mouvement dans l'éclissage, ce qui atténue donc la rigidité qui intéresse le niveau de P_2.

La solution optimale en ce qui concerne le porte-à-faux des rails, la longueur des éclisses, a été recherchée empiriquement depuis bien longtemps par les praticiens. La théorie permet de mieux comprendre les phénomènes, mais pas de calculer des valeurs chiffrées recommandables.

La suppression des joints constitue évidemment la meilleure solution. Encore faut-il que les deux rails que l'on soude ne comportent pas de déformations permanentes à leurs extrémités, que celles-ci soient parfaitement alignées lors de la soudure et que le dressage sur 2 ou 3 mètres soit contrôlé après réalisation de la soudure. Sinon, on aura quand même un défaut angulaire qui produira des effets semblables à ceux du joint.

Le rail et la roue supportent les dommages correspondant à ces phénomènes : écrasement des abouts de rail, fissuration horizontale du champignon, fissuration des trous d'éclissage (choc aux joints), écrasement des abords de la soudure, naissance et développement rapide des taches ovales sous soudures creuses. L'effort P_2 transmis avec retard aux traverses voisines du choc, bien que notablement inférieur à celui du choc P_1, provoque une aggravation de la détérioration du nivellement de la voie.

Ces phénomènes sont d'autant plus importants que la vitesse est élevée, que le joint ou que la soudure sont "creux" et, pour P_2, que le support du rail est moins élastique, que la masse non suspendue du véhicule est plus importante. Le phénomène est aggravé si les traverses voisines du joint ou de la soudure creuse sont "danseuses" (c'est-à-dire s'il y a un vide sous les traverses).

7.4.2. Méplat

Le méplat d'une roue est constitué par une partie plane sur le cercle de roulement, en général à la suite d'un enrayage. Les études théori-

ques sur l'influence du méplat, dont les résultats ont été confirmés par des mesures, ont mis en évidence l'existence d'une vitesse critique V_c de l'ordre de 20 à 40 km/h suivant l'importance du méplat, où l'impulsion dynamique est maximale.

Pour $V < V_c$, la roue ne quitte pas le rail et l'impulsion au moment du choc de l'extrémité du méplat est simplement proportionnelle à la longueur ℓ du méplat, à la vitesse V, à la masse par roue m, et inversement proportionnelle au rayon R de cette roue.

Pour $V > V_c$, la roue quitte le rail et l'impulsion, toujours proportionnelle à ℓ, varie comme l'expression $m\ell\left[\frac{\alpha}{V} + \frac{\beta V}{R}\right]$ et présente donc un minimum pour $V = \sqrt{\frac{\alpha R}{\beta}}$ (50 à 60 km/h), puis croît à nouveau, mais moins vite que la vitesse.

Ce qui a été dit ci-avant à propos du choc au joint en ce qui concerne les élasticités et masses à prendre en compte reste valable ici.

Le RIV et le RIC (14) fixent à 60 mm la longueur maximale admissible d'un méplat (méplat de 1 mm de creux pour une roue de 900 mm de diamètre). Cette règle n'est pas toujours respectée faute de moyens de détection (15).

Avec un méplat de 2 mm de profondeur et une charge de roue Q = 10 t, la surcharge dynamique à la vitesse critique est de 100 % environ. Si le support est très rigide, plateforme et ballast gelés par exemple, les surcharges peuvent être encore plus élevées alors que le rail est plus fragile du fait du froid. C'est ainsi qu'un réseau a observé une série spectaculaire de ruptures de rails sous l'effet d'un méplat de dimension d'ailleurs supérieure à la limite réglementaire.

---

(14) RIV (Regolamento Internationale Veicoli) : règlement pour l'emploi réciproque des wagons en trafic international définissant entre autre les prescriptions techniques concernant les wagons.

RIC (Regolamento Internationale Carroze) : règlement pour l'emploi réciproque des voitures et fourgons en trafic international définissant entre autres les prescriptions techniques concernant les voitures à voyageurs et les fourgons.

(15) Certains dispositifs ont été mis au point.

7.5. Efforts verticaux et fatigue de la voie

7.5.1. La différence entre l'élasticité verticale h de la voie et celle des suspensions primaires et secondaires du véhicule est telle que la valeur de la première n'a pratiquement aucune influence sur l'amplitude des oscillations des masses suspendues et semi suspendues du véhicule ; seule la géométrie ''statique'' de la voie, son tracé et ses défauts jouent un rôle. Autrement dit la structure de la voie et l'importance de sa flexion sous charge n'interviennent pas (16). Mais si cette flexion n'influence pas les surcharges dynamiques à basse fréquence, par contre la détérioration progressive de la géométrie de la voie sous les efforts répétés en dépend, l'énergie absorbée par ces flexions répétées augmentant avec leur amplitude. Nous avons vu que l'amplitude des surcharges dynamiques dues aux masses suspendues est d'autant plus faible et augmente d'autant plus lentement avec la vitesse que la suspension est plus souple. Ainsi, les wagons de marchandises à fortes charges par essieu (20 t) dont la suspension unique est relativement raide provoquent à 80 km/h des flexions de la voie plus importantes que les essieux d'un TGV à vitesse trois fois plus élevée mais dont la suspension est beaucoup plus souple, bien que la charge par essieu (16,3 t) ne soit inférieure à celle du wagon de marchandises que de 18,5 %.

L'oscillation des masses non suspendues du véhicule dont la fréquence est de plusieurs dizaines de Hertz dépend fortement, nous l'avons vu, de la structure de la voie et de son élasticité. Il faut d'ailleurs en toute rigueur associer une certaine portion de la voie à la masse non suspendue du véhicule. Dès que la vitesse s'élève sensiblement les surcharges dynamiques dues aux masses non suspendues deviennent prépondérantes bien que celles-ci ne soient qu'une fraction de la valeur des masses suspendues (10 % pour une voiture voyageurs ou le TGV, 18 % pour une locomotive).

On trouvera sur le tableau 4 des valeurs provenant des très nombreuses mesures faites par la SNCF et au sein de l'ORE. La charge dynamique à 2 écarts types représente assez bien ce qu'on appelle les ''grandes valeurs courantes''. Les surcharges dynamiques dues aux

---

(16) Sauf bien entendu dans le cas de plateforme marécageuse où la valeur de h de la voie peut être anormalement faible et la fréquence d'oscillations des masses non suspendues de quelques Hz.

masses non suspendues s'évaluent facilement à partir des mesures d'accélérations verticales des boîtes d'essieux. Celles dues aux masses suspendues nécessitent l'emploi de dynamomètres. La combinaison d'accélérations de châssis de bogie et de caisse peut aussi donner une évaluation de ces surcharges, mais dans ce cas il vaut mieux se limiter aux caractéristiques statistiques de la distribution. En collant des jauges sur le rail on peut aussi mesurer les charges dynamiques totales, mais ceci ne peut se faire bien entendu qu'en un nombre limité de points.

En ce qui concerne la fatigue de la voie, il n'existe pas encore de critère suffisamment fondé permettant de la définir à partir de la distribution des efforts Q exercés.

Quelques études faites par la SNCF puis reprises par l'ORE conduisent à avancer une formule en Q^{α}, α étant compris entre 2 et 3, α étant plus proche de 2 pour ce qui concerne la dégradation de la géométrie de la voie, plus proche de 3 en ce qui concerne les avaries de fatigue des rails telles que les taches ovales ou les fissures horizontales du champignon.

Si on retient $\alpha = 3$, la fatigue F se chiffre par la somme $\Sigma\, Q^3$. Soit pour un ensemble de valeurs Q dynamiques exercées par des roues de même charge nominale Q_N, dont la distribution est caractérisée par l'écart type σ ou l'écart relatif $s = \dfrac{\sigma}{Q_N}$:

$$F = Q_N^3 \,.\, (1 + 3\, s^2)$$

Sur le tableau précité on a aussi donné la valeur de F pour les essieux de divers véhicules.

**Efforts dynamiques verticaux exercés sur le rail
par les roues de divers véhicules
et fatigue correspondante subie par la voie**

Notations Q_{ns}		masse non suspendue	par roue
Q_s		masse suspendue	par roue
Q_N	=	$Q_{ns} + Q_s$ = masse totale	par roue
σ_{ns}		écart type des surcharges dynamiques due à la masse non suspendue	

σ_s écart type des surcharges dynamiques due à la masse suspendue

σ_t écart type total $= \sqrt{\sigma_{ns}^2 + \sigma_s^2}$

Q_{max} effort dynamique total à 2 écarts types $= Q_N + 2\,\sigma_t$

F fatigue de la voie évaluée conventionnellement par la formule

$$F = \overline{Q}_N^3 \left[1 + 3 \left(\frac{\sigma_t}{Q_N} \right) \right] \text{ (en } t^3\text{)}$$

1) La qualité de la voie considérée est celle d'une ligne classique importante sur laquelle la circulation de rames voyageurs remorquées est admise à 200 km/h. La voie est en alignement droit.

	en tonnes							(en tonnes)^3
	Q_N	Q_{ns}	Q_s	σ_{ns}	σ_s	σ_t	Q_{max}	F
Locomotive BB 9100 à V 100 km/h	10,5	1,6	8,9	1,25	1,35	1,85	14,2	1265
Locomotive BB 9100 à V 200 km/h	10,5	1,6	8,9	2,50	1,90	3,15	16,8	1470
Locomotive CC 21000 à V 200 km/h	10,25	1,6	8,65	2,50	2,0	3,20	16,65	1392
Wagon de marchandises à 20 t/essieu à V 100 km/h	10,00	0,6	9,4	0,8	2,1	2,25	14,5	1152
Voiture voyageurs moderne à V 200 km/h	6,3	0,6	5,7	1,35	0,85	1,60	9,5	298
TGV à V 200 km/h	8,15	0,8	7,35	1,7	1,1	2,00	12,15	639
TGV à V 300 km/h	8,15	0,8	7,35	2,6	1,3	2,90	13,95	746

2) La qualité de la voie est celle obtenue sur la ligne nouvelle Paris-Sud-Est : rails très bien dressés en usine et défauts de grande longueur d'onde corrigés.

TGV à V 300 km/h	8,15	0,8	7,35	1,85	1,0	2,1	12,35	649

TABLEAU 4

Si les essieux de locomotives dont la masse nominale dépasse 20 t par essieu et dont les masses suspendues sont relativement importantes fournissent les valeurs les plus élevées de Q_{max} et de F, les wagons de marchandises à charge maximale de 20 t/essieu viennent immédiatement après.

On notera aussi que les essieux du TGV sont moins agressifs à 200 km/h et même 300 km/h, et que sur la voie ayant la qualité de celle de la ligne nouvelle Paris-Sud-Est, c'est-à-dire où l'on a prêté une grande attention au dressage des rails en usine (défauts de courte longueur d'onde : 1,5-2 m), ainsi qu'aux défauts de grande longueur d'onde (40-60 m), l'agressivité des essieux du TGV est pratiquement la même à 300 km/h sur une telle voie qu'à 200 km/h sur une voie classique de bonne qualité et notablement inférieure à celle des wagons de marchandises.

Les valeurs d'efforts considérées ci-dessus et données dans le tableau font abstraction des chocs et des défauts d'usure ondulatoire de courte longueur d'onde (quelques centimètres). Nous avons vu, dans le cas des chocs, que les efforts dynamiques peuvent atteindre plusieurs fois la charge statique de roue. L'entretien des joints était une source de dépenses importantes (rechargement des abouts, retraits de rails pour fissuration, décollement du champignon, remplacement d'éclisses, entretien spécial du nivellement des joints), et l'état des joints était un des motifs principaux de renouvellement des rails.

L'usure ondulatoire fera l'objet d'un chapitre spécial ; dans le cas de l'usure ondulatoire courte, les roues sont soumises à une vibration forcée de fréquence proportionnelle à la vitesse et dont l'amplitude croît plus vite. Il en résulte des surcharges importantes que l'on ne peut mesurer que par des jauges collées sur la roue ou sur le rail (les contraintes dans la zone de contact rail-roue ne sont pas accessibles à la mesure).

Avec une usure ondulatoire de 6 cm de longueur d'onde et 0,10 à 0,20 mm de creux, on a mesuré sous une locomotive BB 9200 de 10,3 t de charge de roue nominale :

$$\pm\ 10 \text{ kN à } 60 \text{ km/h à } f = 278 \text{ Hz}$$

$$\pm\ 36 \text{ kN à } 140 \text{ km/h à } f = 648 \text{ Hz}$$

$$\pm\ 41 \text{ kN à } 180 \text{ km/h à } f = 830 \text{ Hz}$$

Ces surcharges s'ajoutent aux surcharges de fréquence moindre dont on a donné les ordres de grandeur ci-avant. Cette augmentation rapide s'explique par le fait que la fréquence excitatrice se rapproche de la

zone des fréquences propres du rail, qui va de 1 000 à 2 500 Hz. Ce phénomène est très destructeur ; on conçoit qu'il faille éliminer par meulage l'usure ondulatoire à un seuil d'autant plus bas que la vitesse est élevée.

7.5.2. On peut caractériser le niveau de dégradation d'une voie par l'écart entre l'un de ses paramètres (profil en long, gauche, etc...) juste avant et immédiatement après une opération d'entretien. On constate empiriquement qu'en désignant par e_0 et e_1 ces deux états, on a une relation de la forme :

$$e_1 - e_0 = k\, P^{\alpha} T^{\beta}$$

P étant la charge dynamique par essieu et T le trafic de la ligne avec, comme nous l'avons vu :

$$P = P_0\,(1 + \lambda V)$$

P étant la charge nominale statique et V la vitesse.

Un calcul simple montre alors que le coût d'entretien C, c'est-à-dire en fait le maintien de la géométrie de la voie est, à tonnage égal, proportionnel à $P^{\alpha/\beta}$. Or, on constate que :

$0{,}8 < \alpha < 1{,}2$ avec une valeur probable de 1
$0{,}2 < \beta < 0{,}5$ avec une valeur probable de 0,30

Une valeur de 3 est donc une assez bonne approximation de $\frac{\alpha}{\beta}$.

A partir des charges dynamiques figurant au tableau 4, la dégradation correspondant à une circulation marchandises à 20 tonnes par essieu sera dans un rapport d'environ $\left(\frac{14}{12{,}5}\right)^3$ avec celle du TGV, soit donc supérieure de 40 %. Avec une charge d'essieu de 30 tonnes, elle serait 5 fois plus élevée.

Pour des raisons de confort, les circulations voyageurs réclament une meilleure géométrie de la voie que les circulations marchandises : il y a donc un intérêt économique évident à séparer les deux natures de trafic dès que la vitesse dépasse 200 km/h.

Le calcul est légèrement différent si l'on considère la dégradation du matériel, c'est-à-dire en fait celle des rails. Le pourcentage N de rails remplacés peut également s'exprimer par une loi de la forme $AP^{\alpha}T^{\beta}$. On en déduit le pourcentage de rails à remplacer par unité de trafic :

$$\frac{dN}{dt} = A\beta P^{\alpha} T^{\beta-1}$$

Soit $\left(\frac{dN}{dT}\right)_M$ le taux maximal admissible à la fois pour des raisons de sécurité et des raisons de disponibilité de la ligne, ce taux pouvant d'ailleurs être plus élevé sur une ligne à trafic uniquement marchandises. On en déduit le tonnage maximal T_M admissible entre deux opérations de renouvellement de rails et par conséquent le coût C.

$$T_M = \frac{K_1 \left(\frac{dN}{dT}\right)_M^{\frac{1}{\beta - 1}}}{P^{\alpha/\beta-1}} \qquad \text{et } C = K_2 \frac{P^{\alpha/\beta-1}}{\left(\frac{dN}{dT}\right)_M^{\frac{1}{\beta - 1}}}$$

Le coût est proportionnel à la puissance $\frac{\alpha}{\beta - 1}$ de la charge par essieu et inversement proportionnel à la puissance $\frac{1}{\beta - 1}$ des exigences de maintenance.

Les valeurs les plus probables d'α et β étant 4 et 2,5, on en déduit que le coût d'entretien des rails est proportionnel à $P^{\alpha/\beta-1} = P^{2.66}$, ce qu'ont d'ailleurs constaté nombre de réseaux. N'oublions pas enfin que K_2 dépend de la qualité géométrique de la voie et que le coût diminue lorsque cette qualité s'élève.

8. Phénomènes transversaux

8.1. Cinématique de l'essieu dans la voie

La solidarité des deux roues d'un même essieu impose de donner aux bandages une conicité qui a un effet d'auto-centrage de l'essieu lorsqu'il tend à se déplacer transversalement ; dans les courbes, les phénomènes de glissement se trouvent atténués, chacune des roues ayant des cercles de roulement de valeurs différentes.

Le rail est normalement posé avec une inclinaison de 1/20e. Jadis le profil des roues avait une partie plane également inclinée au 1/20e. Maintenant, on reprofile généralement les roues à un profil voisin d'un profil dit d'usure qui est celui que l'on observe au bout d'un certain nombre de centaines de km parcourus.

En position médiane de l'essieu, le contact avec le rail se fait dans la région de l'axe de symétrie du rail, exactement dans cet axe si l'inclinaison de la partie centrale du bandage de roue est au 1/20e, au voisinage si cette partie centrale est au 1/40e, comme c'est le cas pour les véhicules circulant à grande vitesse, cette inclinaison s'étant avérée plus avantageuse pour des raisons de stabilité de marche.

L'essieu effectue un mouvement dit de "lacet" ; la théorie mathématique montre que ce mouvement est sinusoïdal ; il se compose d'un mouvement transversal et d'un mouvement de rotation autour d'un axe vertical.

Les cotes d'essieux, précisées dans l'Unité Technique, doivent être comprises entre 1 410 mm et 1 424 mm, cotes mesurées dans un plan situé à 10 mm au-dessous des cercles de roulement, à une distance de 70 mm des flancs intérieurs (fig. 14).

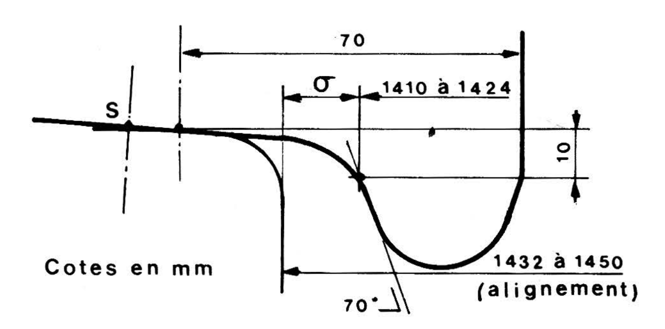


Fig. 14. — *Mesure des cotes d'essieu*

La largeur de la voie, mesurée à la cote — 15 mm sous le plan de roulement, varie par construction, puisque dans les courbes de faible rayon on donne une surlargeur par rapport à la valeur nominale de 1 435 mm, pour permettre l'inscription des trains d'essieux moteurs. A cette marge de construction, il faut ajouter des tolérances d'entretien variables suivant la catégorie de ligne ; les limites absolues varient de 1 432 mm à 1 470 mm pour la voie standard (18).

La liberté partielle de mouvement de l'essieu par rapport au véhicule conduit dans certains cas à un deuxième contact de la roue sur le rail.

---

(18) Les principes étudiés pour la voie standard peuvent être transposés sans difficulté aux voies larges espagnoles et russes, et aux voies étroites (1 m ou 1,06 m) de nombreux réseaux d'Outre-Mer.

L'oscillation transversale de l'essieu autour de sa position médiane est alors accompagnée d'une angulation de braquage dans la voie avec deux points de contact A et B. Le second point B est situé avant ou après le point axial A, suivant que l'attaque est positive ou négative (figure 15).

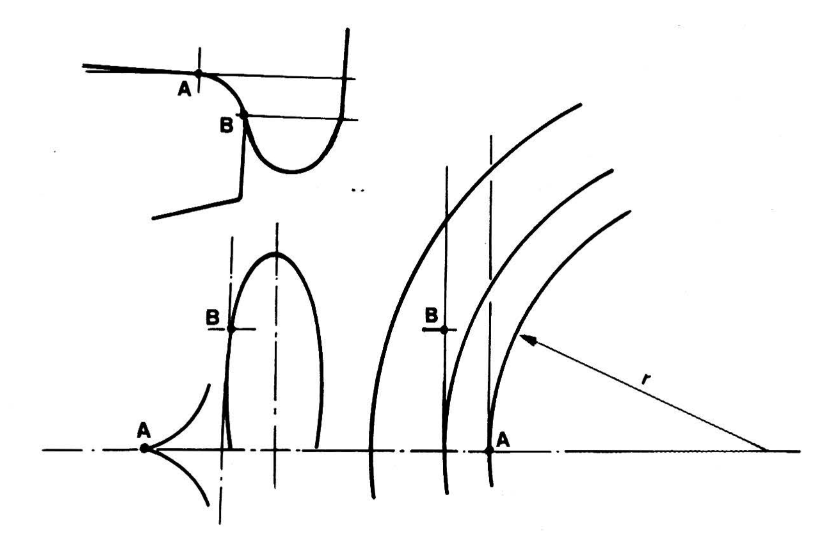


Fig. 15. — *Points de contact roue-rail*

Au-delà de cette position, seul le point B existe, la roue s'élevant au-dessus du rail. Le deuxième contact B favorise l'usure latérale du rail par chanfreinage, et l'usure latérale du boudin par suite de son excentrement par rapport au centre instantané de rotation.

8.2. Contact rail-roue

Tant que les déformations restent élastiques, l'étude du contact rail-roue s'analyse en statique et dans l'hypothèse élastique par la théorie de Hertz. Mais le roulement fait intervenir le phénomène de ''pseudo-glissement''. Dans ce dernier cas, il convient d'ajouter à la vitesse circonférencielle de roulement d'origine cinématique une autre

vitesse d'origine élastique qui provient des déformations mécaniques de l'acier qui se produisent dans la zone de contact entre la roue et le rail. La figure 16 représente l'aire de contact de forme ellipsoïdale qui se partage en deux aux faibles vitesses ; la partie S_1 correspond à la zone où les glissements sont dans le même sens que les glissements d'origine cinématique ; dans la partie S_2 ils sont dans le sens inverse. Une partie de l'aire est en compression, l'autre en traction. Dans la théorie classique de Coulomb, les deux forces de glissement s'ajoutent alors que dans la théorie du ''pseudo-glissement'' elles se retranchent. La surface S_1 augmente avec la vitesse au détriment de S_2 jusqu'à occuper la surface totale du contact ; à partir de ce moment, on retrouve la loi de Coulomb en glissement pur.

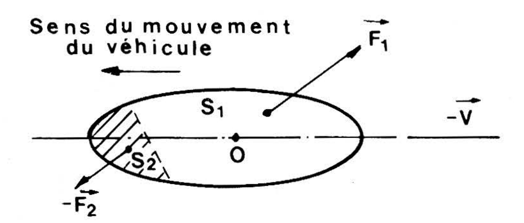


Fig. 16. — *Pseudo-glissement*

La déformation d'un pneu en roulement permet de représenter ce phénomène.

Les expériences faites sous la direction de Robert Lévi ont montré que sur une machine à vapeur à roues voisines de 2 m, circulant à une vitesse de l'ordre de 100 km/h, la vitesse de glissement longitudinal est voisine de 30 m/sec, soit de l'ordre du 1/100e de la vitesse circonférencielle de roulement. Le rapport $u = \frac{v}{V} = \frac{\text{vitesse de glissement longitudinal}}{\text{vitesse d'avancement du véhicule}}$ est appelé pseudo-glissement longitudinal. La force tangentielle longitudinale est égale à la force normale N multipliée par u et un facteur f : coefficient de pseudo-glissement $F_x = f\ N\ u$. De même, il y a une force F_y transversale, le coefficient de pseudo-glissement transversal pouvant diffé-

rer du coefficient longitudinal. Cette proportionnalité n'existe que pour les faibles valeurs de u ; quand u augmente, on a :

$$F = \Phi N \qquad \text{avec} \qquad \frac{1}{\Phi^n} = \frac{1}{\varphi^n} + \frac{1}{(f\,u)^n}$$

φ étant le coefficient de glissement de Coulomb qui varie selon l'état de surface de la roue et du rail. Il en est de même pour l'exposant n généralement plus proche de 2 que de 1. Enfin, f et φ sont fonction des dimensions de l'aire de contact rail-roue, donc de la charge normale N et des rayons de courbure de la roue et du rail ; f et φ diminuent quand N augmente. Le produit Nfu représente de l'énergie consommée.

La force F_x agissant sur la roue est dans le même sens que la vitesse d'avancement dans le cas d'un essieu moteur, dans le sens inverse dans le cas d'un essieu porteur. En cas de freinage, les forces F_x sont dans les deux cas dans le sens inverse.

On voit donc bien que la théorie de Hertz ne peut être qu'une approximation très insuffisante. Les forces tangentielles peuvent modifier considérablement les contraintes dans la zone de contact et provoquer des "usures". Johnson a montré (en 1962) qu'une déformation plastique peut se produire dès que la force tangentielle atteint 1/4 à 1/3 de la force normale (supposée, lorsqu'elle agit seule, ne produire que des déformations élastiques, la contrainte de compression maximale ne dépassant pas 1,7 fois la limite élastique en compression). Or, la force transversale atteint et dépasse fréquemment ce pourcentage sur la file basse dans les courbes. Ceci explique les fluages du métal que l'on constate fréquemment dans les courbes où l'excès de dévers pour les trains lents n'est pas seul en cause. Certains attribuent aussi aux phénomènes de relaxation transversale de roue en courbe l'usure ondulatoire de longueur d'onde moyenne (10 cm et plus).

8.3. Dynamique transversale et stabilité de la voie

L'analyse mathématique du phénomène de lacet d'un véhicule aussi simple qu'un bogie est très difficile même avec des modèles relativement simplifiés. En outre, on ne connaît pas parfaitement les valeurs des paramètres, notamment celle du coefficient de pseudo-glissement

qui peut d'ailleurs varier tout au long du trajet, suivant les états de surface du rail notamment.

Cette étude permet cependant de mettre en évidence plutôt qualitativement que quantitativement les facteurs sur lesquels on peut agir pour améliorer la vitesse critique d'un bogie, c'est-à-dire la vitesse au-delà de laquelle le bogie devient instable (19), ce qui risque d'entraînent des chocs transversaux violents sur la voie. Dans ce cas d'ailleurs, le risque n'est pas tellement d'imposer des contraintes excessives dans le rail, mais d'entraîner un déplacement d'ensemble du châssis de la voie, d'où une déformation latérale permanente qui, même de faible importance, peut entraîner un déraillement.

Il est fondamental que les efforts transversaux H exercés par un essieu de charge P restent inférieurs à une valeur limite H_ℓ. De nombreuses expériences effectuées en France ont permis d'aboutir à la formule de Prud'homme (20) qui donne l'effort transversal limite H_ℓ admissible en fonction de la charge P :

$$H_\ell < A\,(P \pm P_0)$$

Le coefficient A varie en fonction de l'armement de la voie, du ballastage et du degré de stabilisation ou de compacité du ballast. Une opération qui le déconsolide, une opération de nivellement par exemple, peut réduire de près de moitié la valeur de H_ℓ.

Dans la pratique courante pour des voies en traverses bois espacées de 0,60 m, ballastées en pierre cassée et dont le rail est au moins de 46 kg/m, on se réfère à la valeur minimale après une opération de nivellement de la voie par soufflage :

$$H_\ell = 0{,}85\,\left(10 + \frac{P}{3}\right).$$

H et P étant exprimés en kN.

Pour une voie en traverses béton, on se réfère à :

$$H_\ell = 15 + \frac{P}{3}$$

---

(19) En-dessous de cette vitesse, le mouvement de lacet déclenché par une cause quelconque est amorti, au-dessus, il est contre-amorti.

(20) A. Prud'homme : ''La résistance latérale de la voie aux efforts transversaux exercés par le matériel roulant'' - RGCF Janvier 1967

L'influence du poids métrique du rail est faible : elle augmente H_ℓ de moins de 10 % quand on passe du rail 46 kg au rail 60 kg. L'influence de l'épaisseur du ballast et de la surface d'appui des traverses est plus importante. Ainsi la voie de la ligne TGV Paris-Sud-Est, avec traverses mixtes en béton dont les blochets sont plus longs que ceux des traverses antérieurement utilisées et une épaisseur de ballast de 30 à 35 cm au lieu de 15 cm, a une résistance latérale sous charge supérieure d'environ 30 %.

Le passage des trains sur une voie récemment nivelée provoque des vibrations sous charge qui accroissent progressivement la compacité du ballast et par suite sa résistance transversale. La valeur maximale de H_ℓ est atteinte après passage d'un trafic de plusieurs centaines de milliers de tonnes. Elle est d'environ 80 % supérieure à la valeur minimale. On peut représenter l'évolution en fonction du tonnage écoulé T sous la forme :

$$\frac{H_\ell}{H_{\ell_o}} = a \left[1 - b\, e^{-\frac{T}{T_o}} \right]$$

avec a = 1,8, b = 0,45, T_o = 80 000 tonnes.

Seules les mesures permettent, pour un véhicule donné, de connaître les efforts H qu'exercent ses essieux, constamment variables en fonction de nombreux paramètres.

Si l'on considère un véhicule stable, les efforts transversaux H peuvent être décomposés en :

— un terme quasi statique H_c nul en alignement droit et dont l'importance varie en courbe avec la fraction, non compensée par le dévers de la voie, de la force centrifuge ;

— un terme aléatoire H_a dépendant de la vitesse du véhicule, de l'état géométrique de la voie et aussi de l'insuffisance de dévers.

L'effort aléatoire H_a a trois origines possibles :

1°) Une instabilité de bogie, circulant à une vitesse supérieure à sa vitesse critique. Les efforts peuvent alors être très importants et atteindre des valeurs dangereuses à vitesse élevée.

2°) Une coïncidence entre fréquence de lacet de bogie et de lacet de caisse : phénomène de résonance. Tant que le lacet de bogie reste amorti, c'est-à-dire tant que la vitesse reste inférieure à la vitesse critique d'instabilité du bogie (voir ci-dessus), les efforts correspondant à ce phénomène de résonance restent modérés, à moins que la vitesse à laquelle se produit cette résonance soit élevée. Ce n'est jamais le

cas avec les véhicules modernes dont la fréquence de lacet de caisse est basse, de l'ordre du Hz.

3°) Les réactions du véhicule aux défauts de voie. Le problème est beaucoup plus compliqué que dans le plan vertical car la voie intervient dans le système par deux entrées : le nivellement transversal fortement couplé au véhicule, et le dressage de la voie faiblement couplé en alignement, mais d'autant plus fortement en courbe que l'insuffisance de dévers est élevée.

Seules des formules empiriques peuvent être établies à partir de mesures d'efforts réels.

Des analyses statistiques ont montré que, par exemple, pour une locomotive, cette part aléatoire pouvait être "majorée" par le terme $\frac{PV}{1000}$, V étant la vitesse en km/h et P le poids par roue en kN.

On peut ainsi déterminer sur une voie donnée les relations utiles entre dévers, vitesse et rayon de courbe en assurant la condition de stabilité :

$$H_c + H_a \leqslant H_\ell$$

$$1{,}1 \frac{PI}{1500} + \frac{PV}{1000} \leqslant H_\ell$$

(P en kN, V en km/h, I insuffisance de dévers en mm) (21).

En 1973, après des essais effectués avec la rame à turbine à gaz RTG 01 sur des voies de qualités diverses, on a abouti à la formule d'ajustement suivante :

$$H_a = 0{,}75 + 4{,}10\,U + 5{,}3\left(\frac{V - 130}{100}\right) + \left(\frac{21{,}8\,U^2}{10000}\right) + 3{,}85\left(\frac{I - 100}{100}\right)$$

où H_a : effort transversal à l'essieu exprimé en kN,

U : indice de qualité de voie exprimé à partir des données fournies par la voiture d'auscultation de la voie en prenant en compte à la fois le nivellement transversal et le dressage,

I : insuffisance de dévers en mm.

(21) Le coefficient 1,1 du premier terme tient compte du fait que la force centrifuge non compensée ne se répartit pas également entre les essieux.

A partir de cette formule, et en écrivant sous la forme suivante l'inégalité de circulation limite :

$$0{,}85 \left(10 + \frac{P}{3}\right) \geqslant 1{,}1 \frac{Pl}{1500} + H_a \qquad \begin{cases} P \text{ en kN} \\ l \text{ en mm} \end{cases}$$

il est possible, pour le véhicule considéré, de définir les insuffisances limites admissibles en fonction des paramètres d'état de la voie et de la vitesse mais, précisons-le bien, dans le domaine exploré par les essais, d'où le tableau 5 suivant :

Valeur maximale de l (mm) en fonction de U et de V

U mm \ V km/h	90	110	130	150	170
6	192	187	182	177	173
5,5	205	200	195	190	185
5	223	217	212	207	202
4,5	240	235	229	223	218
4	259	253	247	241	235
3,5	278	272	266	260	254
3	298	292	285	279	273
2,5	319	312	305	299	292

TABLEAU 5

A titre indicatif, signalons que les valeurs courantes de U rencontrées sur nos voies sont de :

U = 2,5 à 3,5 pour une voie courante en bon état d'entretien,

U = 6 est la valeur extrême que l'on peut rencontrer sur des lignes secondaires.

Notons que, pour les autorails et automotrices, on ne dépasse pas 180 mm d'insuffisance de dévers pour des lignes dont l'indice de qualité U est inférieur à 5.

Pour une voie dont U = 3,5 où l'on circule à 200 km/h, selon la formule ci-dessus :

$$H_a = 22 \text{ kN} \qquad \text{avec } I = 180 \text{ mm}$$

alors que la formule $\frac{PV}{1000}$ donnerait : 34 kN.

Cette dernière formule est donc trop pessimiste pour des véhicules modernes ; la valeur de l'effort aléatoire H_a est très en deçà de la valeur $\frac{PV}{1000}$. Ainsi, pour le TGV, lors des essais du record du monde de février 1981, les efforts H_a pour un essieu de 16,3 t n'ont pas dépassé 30 kN à 380 km/h (alors que la formule ici donnerait 63 kN).

Extrapolée au cas du TGV, sur une voie excellente (U = 2), franchissant une courbe de 4 500 m de rayon à 340 km/h avec 130 mm d'insuffisance de dévers, la formule utilisée ci-avant pour la rame RTG 001 donnerait H = 38 kN, c'est-à-dire à peu près la valeur mesurée (40 kN). Et dans le cas particulier de la ligne à grande vitesse, voie lourde noyée dans un lit de ballast compacté, la limite de déformation préalablement testée atteint 140 kN. La marge de sécurité est donc très importante.

9. Vibrations induites par la circulation des trains

La circulation des trains sur une voie ferrée provoque l'émission de vibrations transmises par le sol à des distances assez grandes.

L'origine de ces vibrations se situe essentiellement dans la succession des charges roulantes, des phénomènes de glissement roue/rail et des imperfections géométriques de la roue et du rail.

On peut les classer en trois bandes de fréquences :

— **de 0 à 15 Hz** : essentiellement dues aux masses suspendues et semi-suspendues des véhicules ; elles sont transmises par le sol avec un amortissement très variable suivant la nature du sol et la valeur de la fréquence ;

— **de 15 à 150 Hz** : ces vibrations résultent des oscillations des masses non suspendues. Elles sont affaiblies par le sol de façon notable mais peuvent être gênantes si elles génèrent des vibrations de

structures perceptibles (murs, plafonds), le seuil de danger n'étant jamais atteint même pour des bâtiments très proches de la voie ;

- **au-dessus de 150 Hz** : Ce sont surtout les phénomènes de glissement roue/rail qui les provoquent. Elles sont très vite amorties par le sol mais, par contre, elles produisent, par l'intermédiaire du rail et de la roue comme surface radiante, ce que l'on appelle le bruit de roulement car elles tombent rapidement dans le domaine audible. L'usure ondulatoire est à cet égard particulièrement redoutable car, nous l'avons vu, elle augmente les vibrations du rail et de la roue dans le domaine audible, et d'autant plus qu'avec la vitesse la fréquence de l'excitation rejoint les fréquences propres du rail (1000 - 2500 Hz).

RÉSUMÉ DU CHAPITRE 2

La voie classique avec pose de traverses sur ballast qui est d'utilisation quasi-universelle est soumise à des efforts dont les plus importants sont verticaux et transversaux. Les premiers, de caractéristiques approximativement linéaires, sont abordables par le calcul ou tout au moins permettent l'élaboration de modèles suffisamment représentatifs de la réalité.

Le calcul statique (équation de Zimmermann) basé, à partir de la résistance des matériaux classiques, sur la transmission des efforts du contact rail-roue jusqu'à une plateforme caractérisée par un certain coefficient d'élasticité permet une approche très générale du problème. L'introduction des efforts dynamiques complique sensiblement les calculs, mais sans apporter une réelle amélioration.

Les surcharges dynamiques aléatoires dues aux imperfections du matériel roulant et de la géométrie de la voie et qui jouent un rôle fondamental sont essentiellement dues aux masses non suspendues. On peut les aborder par le calcul à partir du spectre de défauts de la voie de forme générale $\frac{A}{(B+F)^3}$, F étant la fréquence des défauts, mais à ce spectre continu se superpose un spectre de raies dû aux joints, aux soudures et à l'usure ondulatoire, ces raies pouvant entraîner des efforts très importants à certaines vitesses critiques par effet de résonance. Un modèle mathématique relativement simple basé sur le spectre continu classique et dans lequel l'équation différentielle de base est résolue par l'intermédiaire de la transformation de Fourier montre que les efforts dynamiques aléatoires dus aux masses non sus-

pendues sont proportionnels à la vitesse et à la racine carrée du produit de la masse non suspendue par la rigidité verticale de la voie, ce qui a permis de résoudre le problème de la circulation du TGV à grande vitesse par un allègement spectaculaire des masses non suspendues. Naturellement la qualité géométrique intervient dans la formule par un coefficient qui montre l'importance du nivellement aux grandes vitesses. Les masses semi-suspendues et suspendues n'ont relativement qu'une faible importance.

Les conditions de dégradation de la géométrie verticale de la voie ne sont guère connues qu'empiriquement, mais il apparaît que la charge par essieu a une influence considérable sur les défauts de surface des rails. Enfin, les méplats de roues entraînent également une importante augmentation des efforts dynamiques, alors que les joints de rails disparaissent de plus en plus.

Les efforts transversaux sont très difficilement abordables par le calcul, par suite du jeu des essieux dans la voie, de la non linéarité des efforts résistants et des conditions dans lesquelles s'exerce le contact rail-roue. Une série d'essais en voie a cependant permis de définir par la formule de Prudhomme la relation qui doit exister entre la charge verticale et l'effort transversal pour éviter tout risque de déformation de la voie. Des formules empiriques permettent d'apprécier les efforts maximaux admissibles pour chaque type de matériel roulant et pour chaque type de superstructure considéré. Les vibrations engendrées par le roulement des circulations posent avant tout des problèmes de bruit et de transmission par le sol vers l'environnement.

3 LES CONTRAINTES DU RAIL

1. Évolution des charges et des vitesses

On a pu lire dans une brochure publicitaire d'un fabricant de rail le texte suivant : ''Aucun des laminés fabriqués par les usines métallurgiques n'est martyrisé de façon aussi brutale, aussi constante, aussi systématique, que le rail''.

1.1. Dans le chapitre précédent, nous avons passé en revue les diverses sollicitations auxquelles le rail est soumis sous l'effet du trafic. Leur multiplicité et leur complexité sont telles qu'il n'est pas possible de ''calculer'' un rail de façon suffisamment exacte comme on peut avoir la prétention de le faire pour des laminés entrant dans la composition d'une charpente métallique.

Rappelons rapidement ces diverses sollicitations :

- Charges statiques ou quasi statiques variables d'un véhicule à l'autre, et même d'une roue à l'autre d'un même véhicule en raison des inégalités de répartition du chargement et de la force centrifuge non compensée dans les courbes.
- Surcharges dynamiques aléatoires, verticales et transversales qui peuvent prendre des valeurs très élevées par rapport aux charges statiques.

— Chocs se produisant au franchissement des joints ou des soudures creuses, provoqués par des défauts géométriques de la surface de roulement du rail (écaillages, usure ondulatoire...) ou par des méplats de roues.
— Efforts longitudinaux s'exerçant dans la zone de contact rail-roue lors des accélérations ou des freinages et pseudo-glissements superficiels, parfois même glissements francs.
— Efforts thermiques particulièrement importants dans les longs rails soudés (LRS) : efforts de compression en été et de traction en hiver.

L'ensemble de ces sollicitations, qui n'est d'ailleurs en fait pas cumulatif, ne s'exerce pas dans le plan de symétrie du rail. En outre, bon nombre des effets dus aux actions extérieures peuvent être abordés par le calcul et l'expérimentation en vue d'évaluer les sollicitations ; mais, le champ complexe de contraintes qui résulte de ces efforts très variables dans l'espace et dans le temps se superpose aux contraintes résiduelles internes de fabrication dites ''contraintes initiales'' (contraintes provenant du laminage, du refroidissement sur gril et du dressage du rail). Les contraintes globales résultant de la superposition de ces deux champs vont, jusqu'à une certaine profondeur à partir de la surface de roulement, dépasser la limite élastique du métal, tout au moins tant que celle-ci n'a pas été suffisamment relevée par l'écrouissage du métal qui résulte du roulement. Cet écrouissage entraîne une importante modification des contraintes résiduelles initiales de sorte que l'on aboutit finalement à une certaine stabilisation des champs de contraintes résiduelles. Mais, sous l'effet de contraintes excessives, il peut ne pas y avoir adaptation, ce qui entraîne la formation d'écaillages.

Par ailleurs, dans la masse du rail, des concentrations de contraintes résiduelles dues à des hétérogénéités du métal (inclusions, flocons...) peuvent, sous l'effet des charges extérieures, entraîner des fissurations de fatigue par effet d'entaille. Des effets analogues peuvent également se produire à la surface du rail, en particulier dans les congés de raccordement âme-champignon si leurs rayons de courbure sont trop faibles, ce qui en fait ne se produit plus dans les profils modernes de rails.

Ce rapide exposé préliminaire du ''martyre'' du rail suffit à justifier la modestie dont il faut faire preuve dans la recherche de sa compréhension scientifique.

Un empirisme vieux d'un siècle a permis d'adapter progressivement

les dimensions, et la qualité métallurgique du rail aux efforts globaux qu'il supporte en service. Depuis quelques années, des méthodes plus scientifiques permettent une meilleure approche du problème, surtout en offrant une connaissance plus précise de la répartition des contraintes dans les rails et, par conséquent, des éléments sur lesquels on doit agir pour ramener ces contraintes à un niveau compatible avec les efforts répétitifs subis en service.

1.2. Le chapitre I a suffisamment décrit l'évolution des charges (1) et des vitesses pour qu'on n'y revienne plus (fig. 17).

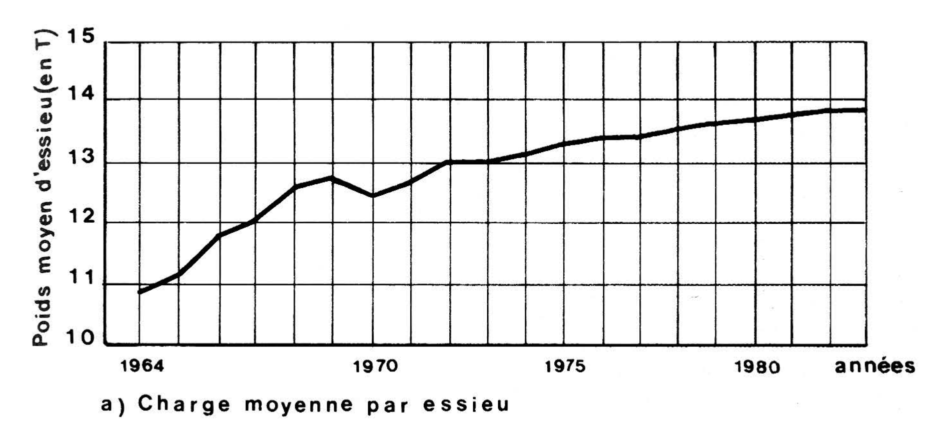


Fig. 17 A. — *Évolution des charges par essieu sur la SNCF*

Nous nous contenterons simplement de rappeler que les charges par essieu varient suivant les réseaux de 15 à 35 tonnes, que les vitesses couramment pratiquées atteignent 160 à 200 km/h (210 km/h sur le TOKAIDO, 270 et 300 avec le TGV) et que certaines lignes peuvent supporter des trafics quotidiens de l'ordre de 300 000 tonnes. Bien entendu, charges lourdes et grandes vitesses sont incom-

(1) La charge moyenne des wagons américains a été majorée de 50 % entre 1945 et 1975.

patibles, sous peine de frais de maintenance prohibitifs ; il n'en reste pas moins qu'un rail, de qualité aussi standard que possible en vue d'un coût acceptable, doit pouvoir répondre à des cas très divers de trafic.

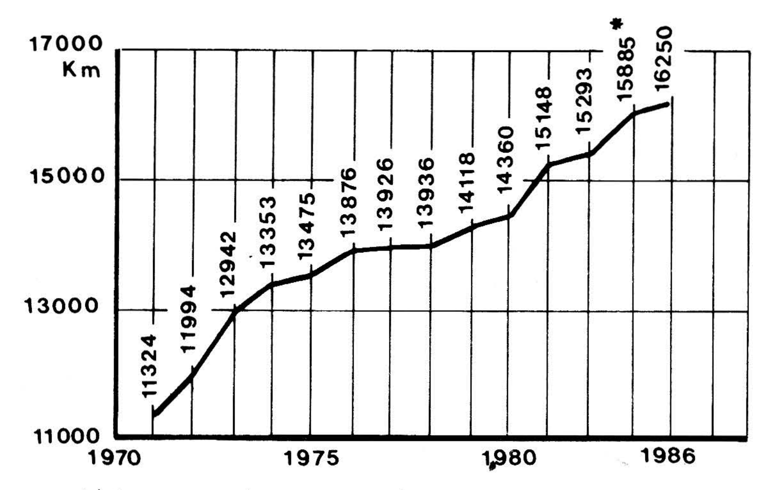


Fig. 17 B. — *Évolution des vitesses sur la SNCF*

L'aspect métallurgique fera l'objet du chapitre IV. Le présent chapitre abordera le double aspect géométrique et mécanique. La figure 18 représente l'évolution moyenne du poids des rails en Europe occidentale, depuis la naissance du chemin de fer. Depuis une cinquantaine d'années, les profils américains et russes, soumis à de lourdes charges par essieu, possèdent une masse plus élevée par m, d'une dizaine, voire d'une quinzaine de kilos. Mais, répétons-le, il n'existe aucune méthode mathématique permettant de définir le profil de rail optimal en fonction des caractéristiques données du trafic concerné (charges par essieu et vitesse). Nous verrons cependant que l'analyse des défauts par des méthodes statistiques permet d'obtenir des informations intéressantes sur le comportement à la fatigue d'une fabrication donnée.

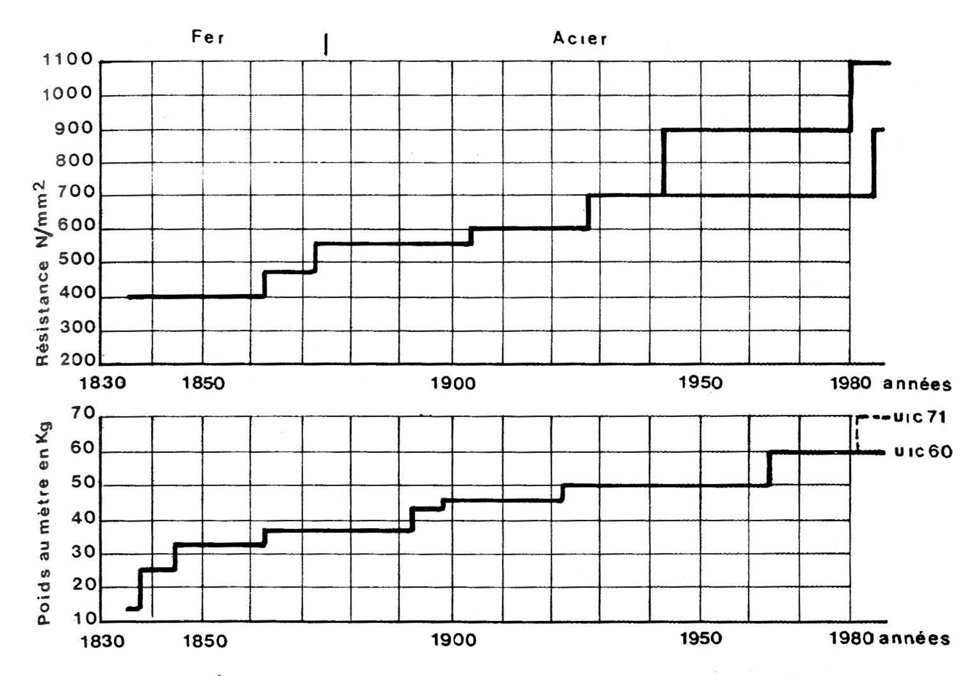


Fig. 18. — Évolution des caractéristiques des rails en EUROPE occidentale

2. Contraintes dans le rail

2.1. Charges statiques verticales centrées

L'application directe de la formule de ZIMMERMANN donne un ordre de grandeur des contraintes statiques de flexion entraînées par la charge d'une roue.

Les résultats figurent, avec le travelage habituel de 0,60 m et une charge de roue de 10 t, sur le tableau 6 :

	Plateforme médiocre	Plateforme moyenne	Bonne plateforme
Coefficient de réaction de traverse	5,75 kN/mm	17,5 kN/mm	35 kN/mm
Contrainte (1)			
— rail de 50 kg	106 N/mm²	81 N/mm²	69 N/mm²
— rail de 60 kg	84 N/mm²	66 N/mm²	57 N/mm²

(1) Contrainte maximale de compression au champignon et traction au patin.

TABLEAU 6

La figure 19 qui représente l'évolution de la contrainte en fonction du coefficient de plateforme et du moment d'inertie vertical du rail met en évidence l'influence fondamentale de ces deux facteurs.

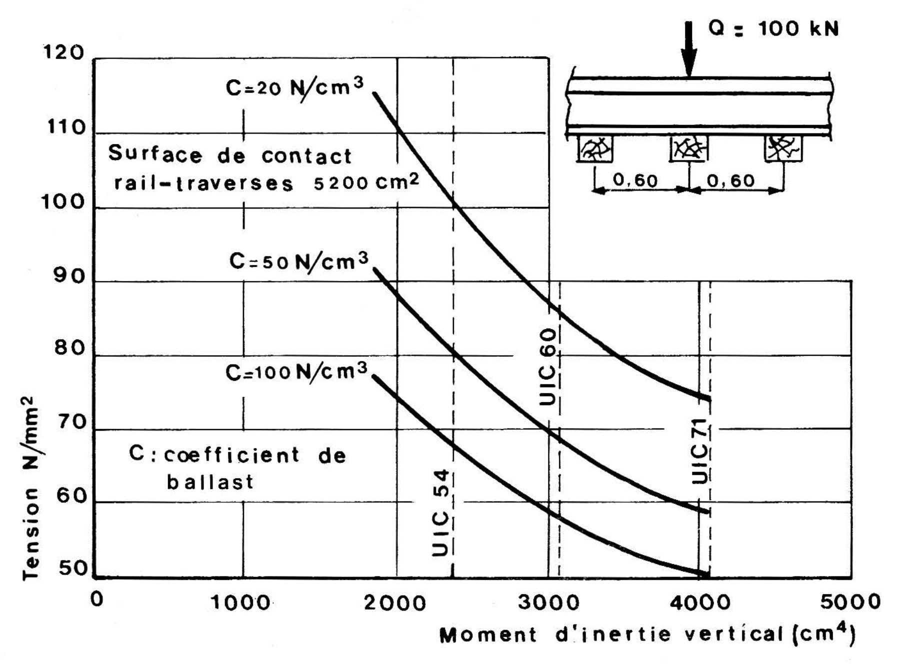


Fig. 19. — *Tension sous le patin*

Les points de moment nul de l'équation de ZIMMERMANN étant à une distance du point d'application de la charge inférieure à l'écartement le plus faible des essieux de bogie ou de locomotive, les charges voisines de la charge considérée ont plutôt pour effet de soulager le rail, et en aucun cas d'augmenter les contraintes.

Il ne faut pas négliger cette approche qui sert finalement de base à bien des comparaisons de profils divers, soumis à des charges statiques d'intensités différentes. Ce simple aspect permet d'orienter le choix d'un profil capable de répondre à une charge maximale par essieu donnée.

2.2. Charges dynamiques

2.2.1. A ces contraintes statiques s'ajoutent les contraintes dynamiques aléatoires. Nous avons vu que, tout au moins pour ce qui concerne les masses non suspendues, de loin les plus importantes, surtout sur les engins moteurs, la valeur quadratique moyenne des efforts aléatoires était proportionnelle à la vitesse, une fois la masse non suspendue et les qualités rhéologiques de la voie déterminées. L'état d'entretien tant du matériel que de la voie joue cependant un rôle important par l'intermédiaire du coefficient k, mais c'est aussi une donnée a priori du problème. Si l'on considère comme gaussienne la répartition aléatoire, on peut affirmer que, à 3 écarts-types, 99,7 % des efforts dynamiques sont pris en compte. Les formules qui ont été proposées par différents auteurs ne peuvent prétendre traduire suffisamment la réalité et n'ont qu'un intérêt limité, car elles ne prennent en compte ni la qualité géométrique de la voie, ni les caractéristiques mécaniques de la voie et des véhicules.

a. **Formule de TALBOT**

$Q_d = Q + 0{,}0062\, Q\, (V - 10)$ Q charge statique
Q_d charge dynamique
V vitesse en km/h

TALBOT fait aussi intervenir le diamètre de roue.

b. **Formule AREA**

$$Q_d = Q\,(1 + \theta) \quad \text{avec} \quad \theta = \frac{D_{33} \,.\, V}{D_w \,.\, 100}$$

D_{33} = 33 (roue de 33 pouces de diamètre)
D_w = diamètre en pouces de la roue
V en miles/heures

c. **Formule d'EISENMANN**

$P_d = P\,(1 + st)$

t : nombre d'écarts-types

s : 0,1, 0,2 ou 0,3 φ suivant que l'on a affaire à une excellente, une bonne ou une mauvaise plateforme.

$\varphi = 1$ si $V < 60$ km/h

$$\varphi = 1 + \frac{V - 60}{140} \text{ si } 60 < V < 200 \text{ km/h}$$

t = 1 couvre 68,3 % des cas
t = 2 couvre 95,5 % des cas
t = 3 couvre 99,7 % des cas

Cette formule a été proposée à partir de résultats de mesures effectuées par la DB et la SNCF, notamment dans le cadre du Comité ORE D 71 au cours de la décennie 1960-1970.

d. **Résultat SNCF**

Les résultats des essais mentionnés au chapitre précédent donnent des résultats du même ordre de grandeur que ceux fournis par la formule d'EISENMANN.

2.2.2. La formule américaine pour les vitesses pratiquées aux USA qui sont en général faibles, est très pessimiste. Par contre, la formule d'EISENMANN donne un ordre de grandeur compatible avec celui des mesures effectuées in situ :

A 200 km/h, majoration des charges statiques de 120 % à 3 écarts types, auxquelles il faut ajouter celle qui résulte des excès et insuffisances de dévers. Bien entendu, la vétusté du matériel, la qualité d'entretien de la voie, la plus ou moins grande sophistication de suspension, jouent un rôle considérable :

un wagon à marchandises à 70 km/h est aussi agressif qu'une voiture moderne à 200 km/h, ou un TGV à 270 km/h.

En fait, la formule d'EISENMANN, limitée à 200 km/h, paraît un peu pessimiste à cette vitesse, tout au moins pour les matériels modernes et les bonnes voies, les seuls à prendre en considération. En outre, la fatigue du rail compte beaucoup plus que les pointes de charges exceptionnelles. La prise en compte d'une surcharge dynamique de

l'ordre de 60 % paraît satisfaisante pour l'estimation des contraintes de fatigue du rail.

D'ailleurs, des essais effectués en Allemagne sous le premier essieu d'une locomotive électrique confirment les résultats de ce calcul un peu simpliste, mais qui donne finalement un bon ordre de grandeur de l'importance du phénomène (fig. 20).

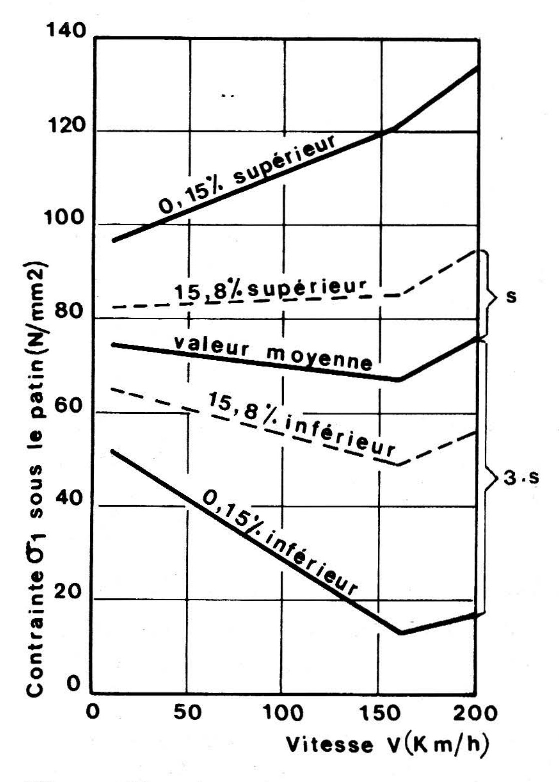


Fig. 20. — *Effort dynamique sous essieu de locomotive*

Au total, dans les pires conditions de fatigue, c'est une contrainte de traction, due aux moments fléchissants, de l'ordre d'une douzaine de kg/mm² (120 daN) que l'acier à rail doit supporter au patin.

2.3. Résultats expérimentaux

2.3.1. En réalité, compte tenu des conditions au contact et de la forme des rails, la distribution des contraintes diffère sensiblement de celles que l'on obtient par la seule application des règles classiques de la résistance des matériaux pour le calcul de la flexion. Il faut donc en faire une analyse plus précise.

Diverses mesures par extensométrie ont permis en laboratoire et en voie de déterminer l'ordre de grandeur de ces contraintes additionnelles. La figure 21 représente le résultat de mesures effectuées sur le contour d'un profil allemand S 54.

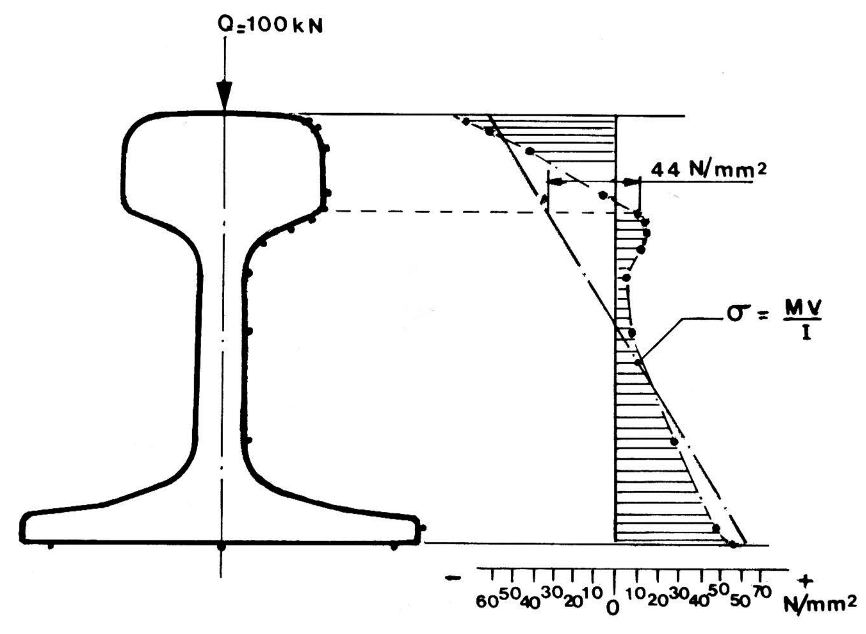


Fig. 21. — *Mesures de contraintes sur profil 54 kg UIC*

2.3.2. On a pu interpréter les résultats des essais par des méthodes simples de calcul, relevant de la résistance des matériaux et qui confirment l'ordre de grandeur des contraintes.

Dans le cas d'une charge verticale centrée, on constate dans le champignon, par rapport aux formules de NAVIER, des contraintes additionnelles de compression dans la partie supérieure de celui-ci et de traction dans la partie inférieure, par suite de l'élasticité verticale de l'âme (fig. 22). Sur le bord inférieur du champignon, ces contraintes atteignent des valeurs de 4,4 daN/mm² pour une roue de 10 t de charge.

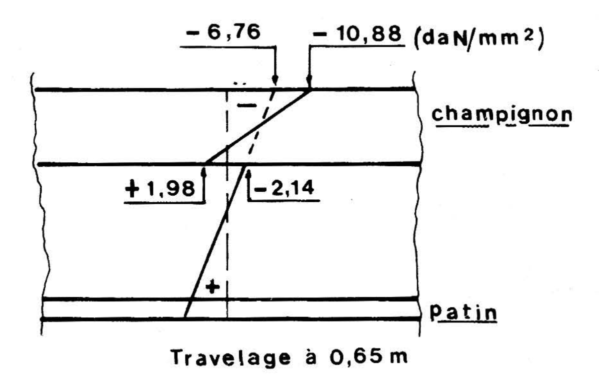


Fig. 22. — *Effet du fléchissement de l'âme*

Finalement, on a calculé en Allemagne les contraintes totales suivantes pour une roue de 10 t, un travelage de 65 cm et une rigidité de plateforme de 10 kg/cm² :

	Rail S 49	**Rail S 60**
— surface du champignon	− 12,86	− 10,88 daN/mm²
— base du champignon	+ 2,24	+ 1,98

L'excentrement de la charge augmente les contraintes sur l'un des flancs du champignon et les diminue sur l'autre. Du côté de la charge, les contraintes qui en résultent sur le bord inférieur du champignon atteignent la valeur de 2,2 daN/mm² pour une roue chargée à 10 t.

2.4. Le rail est également soumis à des efforts de flexion horizontaux et à une torsion sous l'action des efforts transversaux exercés par les véhicules, et de l'excentricité sur le champignon du point de contact rail-roue. Le déplacement latéral du rail dû à la torsion du champignon est négligeable. Par contre, la torsion du patin, surtout dans le cas de pose avec attaches élastiques, peut entraîner, surtout en courbe de faible rayon, un déplacement de 1 à 4 mm.

Les essais ont en outre montré que les contraintes à la base du champignon et au patin peuvent subir une majoration allant jusqu'à 150 % sous l'action d'un effort de guidage horizontal de 50 kN, mais ceci en courbe de 500 m de rayon, donc avec des efforts dynamiques réduits.

Avec les locomotives modernes, et sur une voie en bon état, les efforts transversaux sont de l'ordre de 20 à 25 kN en alignement droit. En rayon de 500 m, ils peuvent atteindre 70 à 80 kN. En courbe, avec une insuffisance de dévers correspondant à 0,10 g, donc avec une surcharge quasi statique de 17 kN, le TGV peut entraîner une charge verticale de roue, à 300 km/h de 185 kN, et des charges transversales de 70 à 80 kN. On aboutit ainsi à des contraintes importantes dans le patin du rail.

Enfin, en courbe de faible rayon, la courbure du rail introduit des effets supplémentaires de compression ou traction au bord du patin. A partir des formules classiques de la contrainte ($\sigma = \frac{MV}{I}$) et de la flèche d'une poutre $\left(\frac{I}{R} = \frac{M}{EI}\right)$, on obtient la contrainte σ :

$\sigma = \frac{VE}{R}$ qui peut atteindre 53 N/mm² pour un rail UIC de 60 kg posé en courbe de 300 m de rayon

2.5. Contraintes dues aux démarrages et freinages des trains

Des mesures effectuées par l'ORE sous divers engins moteurs tirant une rame de 480 t, on peut tirer les conclusions suivantes :

— Du fait de mouvements de cabrage, l'accroissement maximal des charges par essieu apparaît lors du démarrage sous le dernier essieu des engins moteurs. Les valeurs moyennes mesurées (aug-

mentation des charges de 15 à 30 %) coïncident bien avec les valeurs déterminées par la théorie.

– Au freinage, l'accroissement de charges se manifeste sous le premier essieu. Il est en moyenne de 7 à 10 %. Les augmentations de charges par essieu sont plus faibles au freinage qu'au démarrage parce que le coefficient de frottement est moins sollicité lors du freinage.

– Les valeurs maximales des contraintes de cisaillement mesurées sur le flanc externe du champignon lors du démarrage et du freinage (de l'ordre de 5 daN/mm²) ne sont pas plus élevées que celles qui apparaissent aux vitesses supérieures à 120 km/h.

– Les contraintes longitudinales mesurées sur l'âme du rail, lors du démarrage et du freinage, atteignent 0,9 daN/mm², soit 5 t d'effort longitudinal par rail. Ces contraintes ne représentent qu'environ 10 % des contraintes longitudinales provoquées par les variations de température dans les longs rails soudés.

2.6. Contraintes dues aux variations de température

2.6.1. Quelles que soient les conditions de pose, le rail est toujours soumis à des contraintes dues aux variations de température. A partir de la température de fixation du rail, dite "température neutre", le frottement sur les traverses, le plus généralement par l'intermédiaire de semelles en caoutchouc, ne permet pas un libre mouvement de la barre. Il en résulte un diagramme de contraintes dont la forme théorique est représentée par la figure 23. Les contraintes maximales se produisent bien entendu dans les LRS. Dans les barres courtes, ces contraintes sont fonction de leur longueur.

En fait, les diagrammes de contraintes peuvent présenter des écarts sensibles avec le diagramme théorique, surtout si certaines opérations de maintenance telles que la réparation d'une rupture en hiver, ou des opérations de déconsolidation (nivellement) en période chaude, ont été effectuées sans précautions. Le diagramme se déplace parallèlement à lui-même suivant l'axe des contraintes et il peut en résulter des "pics de contraintes" (fig. 24) aggravant les risques de rupture l'hiver, et de déformation l'été (2).

---

(2) Le lecteur pourra trouver une analyse plus détaillée du phénomène dans le livre du même auteur "La voie ferrée" (Éditions Eyrolles).

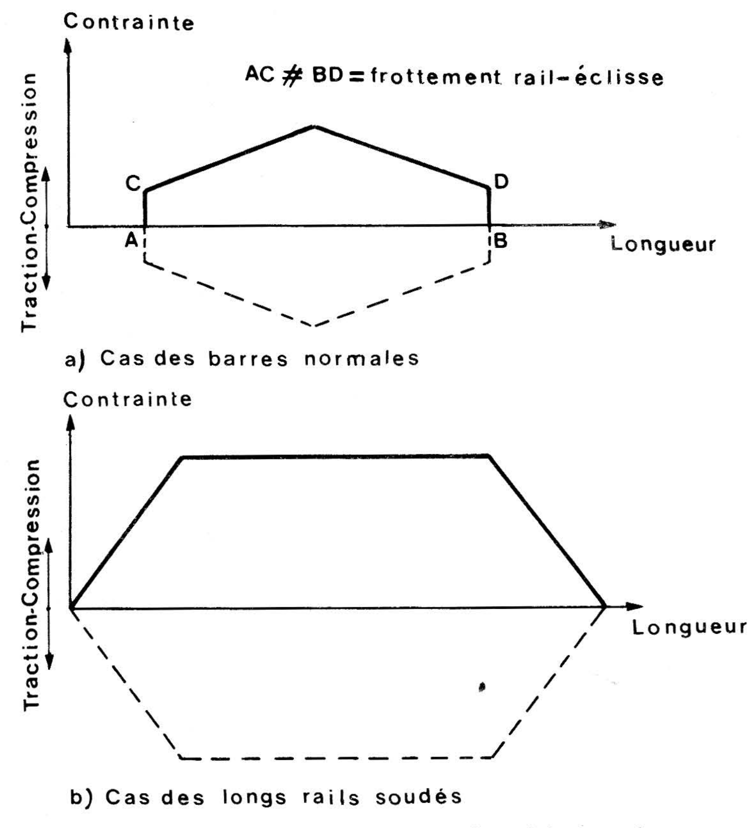


Fig. 23. — *Contraintes théoriques dues à la température*

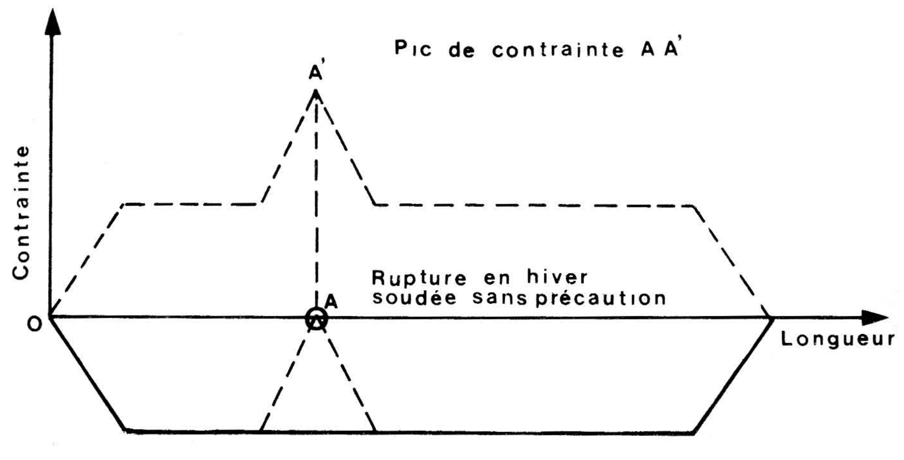


Fig. 24. — *Pic de contraintes*

2.6.2. Il apparaît souhaitable de fixer les LRS à une température neutre, sensiblement équidistante des températures extrêmes prévisibles : quelle que soit la zone de repos, la température maximale ne dépasse que très exceptionnellement 60 degrés ; en zone tropicale, la température minimale ne descend guère au-dessous de 20 degrés ; par contre, en zone tempérée, on atteint − 10 à − 20 degrés et dans certains pays à climat continental − 40 à − 50 degrés. Si le réglage des barres ne pose donc aucune difficulté en zone tropicale, il peut être pratiquement insoluble en zone très continentale ; il faut cependant, en cas d'hésitation sur la température de réglage, se rappeler qu'une rupture en hiver, bien que gênante sur une ligne à trafic dense, est d'autant moins dangereuse qu'elle est détectée automatiquement par les circuits de voie, tandis qu'une déformation par la chaleur présente toujours un risque élevé. Les calculs de stabilité longitudinale des LRS montrent qu'un écart supérieur à 40 ou 45 degrés doit être évité à tout prix ; la température de réglage ne saurait donc descendre en-dessous de 15 à 20 degrés. En France, elle est voisine de 25 degrés (26 ± 6), à mi-chemin entre − 10 et + 60, donc légèrement plus élevée que les moyennes des températures extrêmes assez couramment atteintes en été et en hiver.

La contrainte en résultant dans le rail (traction ou compression) se calcule très facilement par application de la loi de HOOKE. α étant le coefficient de dilatation de l'acier, E son module d'élasticité, S la section du rail, et $\Delta\theta$ l'écart entre la température de pose et la température considérée, la contrainte σ et l'effort total N sont donnés par :

$$\sigma = \alpha E \, \Delta\theta$$

$$N = \sigma S = \alpha E S \, \Delta\theta$$

$$\alpha = 11.10^{-6} \qquad E = 22\,000 \text{ daN/mm}^2$$

Pour $\Delta\theta = 45°$, σ # 11 daN/mm², N # 85 tonnes,

soit 170 tonnes pour l'ensemble des deux rails pour du rail UIC 60.

On s'explique donc que les ruptures de rail se produisent principalement lors des premiers froids, surtout dans le cas de rails anciens à résilience peu élevée.

2.7. Contraintes résiduelles

Le rail est le siège de contraintes résiduelles internes importantes dont on trouve l'origine à deux stades de sa fabrication :

— après laminage, le déséquilibre des masses d'acier entre patin, âme et champignon, entraîne un refroidissement différentiel d'où résulte un cintrage général de chaque barre, à concavité vers le bas, le patin se refroidissant le plus vite ;
— dressage du rail par écrouissage dans une machine à galets, qui tord le rail alternativement vers le haut et vers le bas.

La méthode ancienne (méthode de MAYER) pour mesurer ces contraintes consiste à découper le rail en barreaux élémentaires de 8 × 8 mm dans le sens de la longueur : la libération des contraintes internes qui en résulte entraîne une variation de longueur de ces barreaux. De la mesure de ces variations de longueur, on déduit la valeur des contraintes résiduelles.

D'autres méthodes analogues, appliquées par le Comité ORE C 53, telles que celles de YASOJIMU et MACHII (découpage de tranches minces successives d'environ 6 cm, après mise en place de jauges) et de STAEBLEIN (mesure de flèches après enlèvement de métal par couches successives) ne se sont pas révélées plus précises.

Mentionnons enfin les possibilités offertes par :
— La méthode du trou. Avant et après perçage d'un trou, on mesure à l'aide de jauges les contraintes régnant en un point situé au voisinage du trou.
— La méthode du trépan : on perce une couronne circulaire et on mesure les variations de contraintes en un point situé à l'intérieur de la couronne.
— Les rayons X. La formule de BRAGG établit une relation entre l'angle θ de diffraction d'un faisceau de rayons X de longueur d'onde λ et la distance interréticulaire d du réseau cristallin.

$$\lambda n = 2\,d \sin \theta \quad (n = \text{nombre entier})$$

Or d varie avec la contrainte, que l'on peut mesurer par variation de θ puisque

$$\frac{dd}{d} = \frac{d\theta}{tg\theta}$$

La figure 25 représente les variations des contraintes résiduelles longitudinales, verticales et transversales, dans le champignon du rail, suivant l'axe de symétrie d'une section droite, sur des rails de différentes nuances.

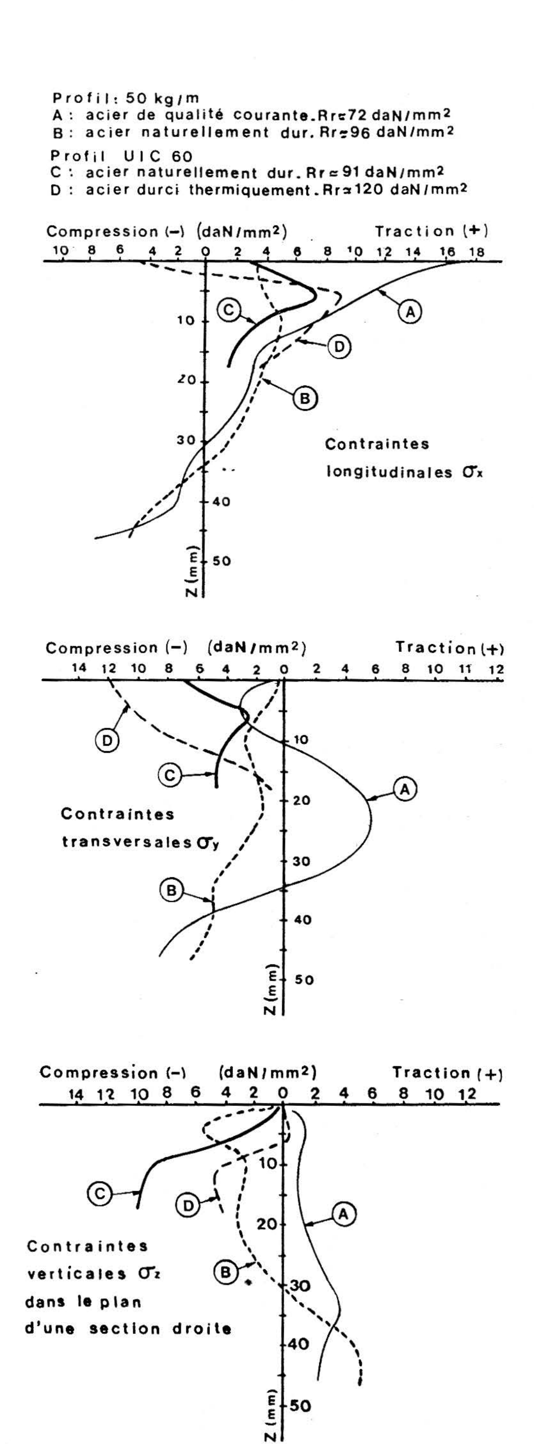


Fig. 25. — *Contraintes résiduelles dans un rail neuf*

En ce qui concerne la contrainte longitudinale, on trouve sur les rails neufs des tractions en surface du champignon dont les valeurs atteignent 16 à 20 daN/mm² pour la nuance ordinaire (75 daN/mm² de limite de rupture). Elles sont cependant d'autant plus faibles que l'acier est de nuance plus élevée. En profondeur, les contraintes s'annulent vers 30 mm, se transformant en compressions, puis s'annulent à nouveau pour redevenir des tractions au niveau du patin du rail (fig. 26). Les contraintes transversales sont au contraire des compressions en surface. Sous l'effet du roulement, les contraintes longitudinales sont modifiées en surface, et diminuent de valeur pour se transformer parfois en compression. Cette modification, qui correspond à l'écrouissage, est obtenue très rapidement (fig. 27 et 28), mais n'affecte qu'une profondeur ne dépassant pas 9 mm. La courbure générale dans le plan vertical des rails retirés des voies centrée vers le patin et de rayon voisin de 800 m, résulte de cet écrouissage, comme l'ont bien montré une série de mesures réalisées à cet effet tant sur des rails droits à l'origine que sur des rails préarqués. Au total, ces contraintes, qui pourraient disparaître à peu près complètement en cas de dressage du rail en usine par traction, peuvent atteindre 10 à 15 daN/mm² (en particulier la contrainte longitudinale de traction au patin du rail) et même dans certains cas, la moitié de la limite élastique de l'acier. La fig. 29 donne le résultat de mesures faites en France en 1982.

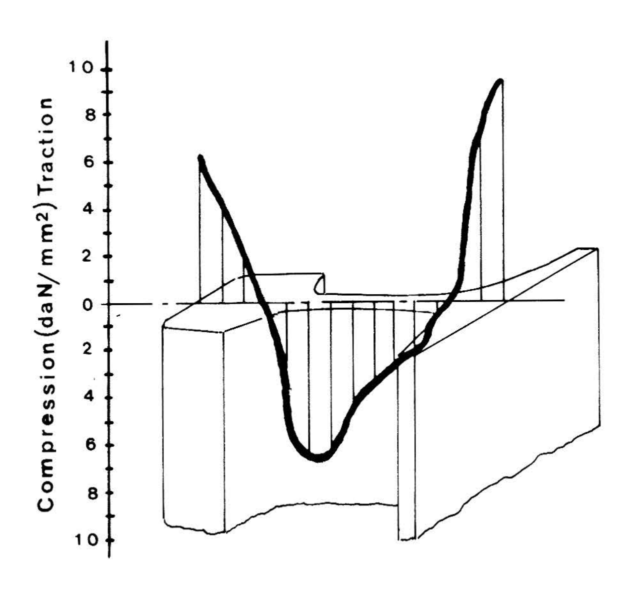


Fig. 26. — *Contraintes résiduelles longitudinales dans un rail neuf*

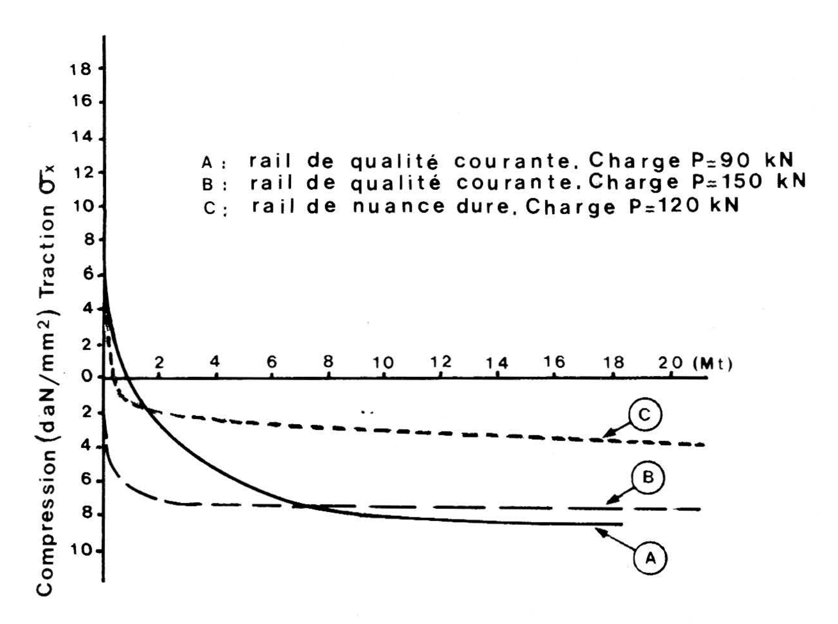
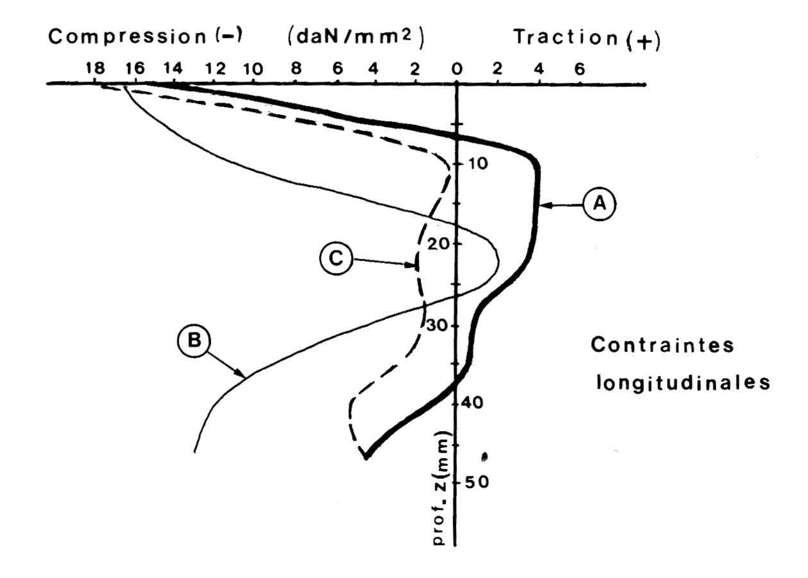


Fig. 27. — *Évolution des contraintes résiduelles*

A – rail de nuance normale. Rr ≃ 72 daN/mm²
retiré des voies après avoir subi un
trafic de 50 Mtbr

B – rail de nuance dure. Rr ≃ 90 daN/mm²
retiré des voies après avoir subi un
trafic de 73 Mtbr

C – rail de nuance dure. Rr ≃ 96 daN/mm²
retiré des voies apres avoir subi un
trafic de 160 Mtbr



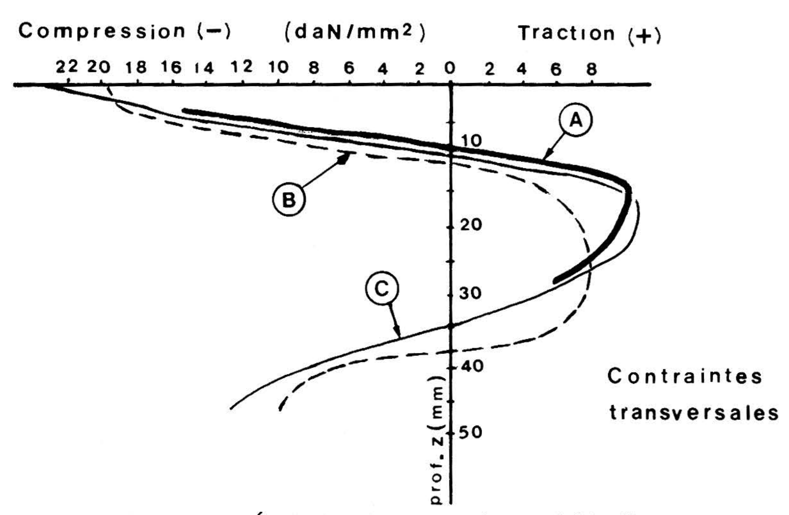
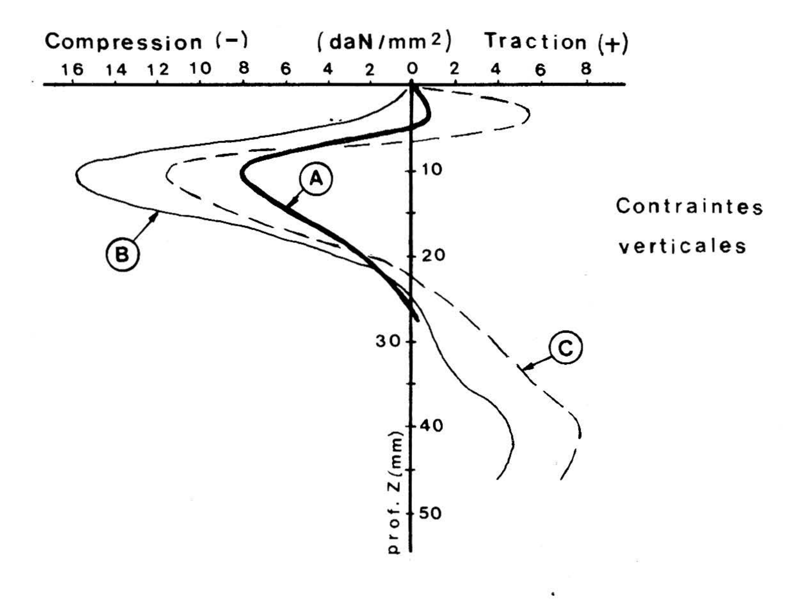


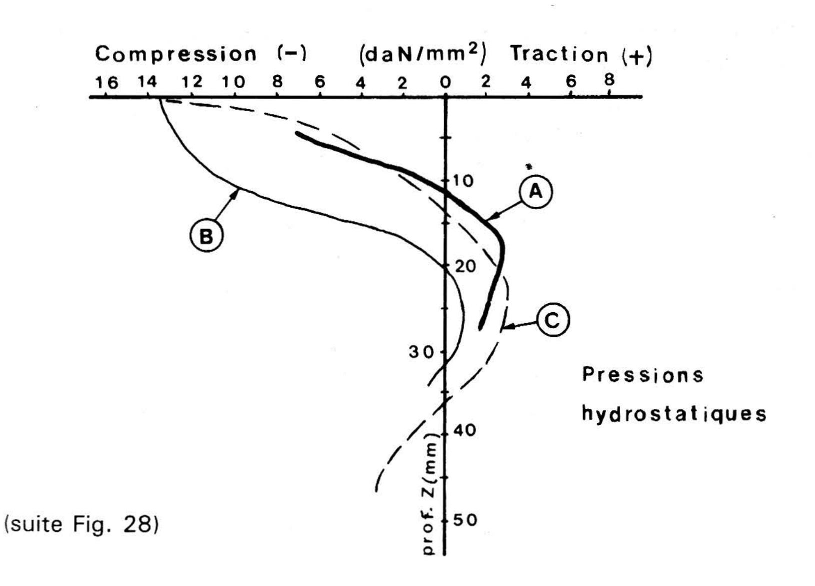
Fig. 28 A/B. — *Évolution des contraintes résiduelles* A

A – rail de nuance normale. Rr ≃ 72 daN/mm²
retiré des voies après avoir subi un
trafic de 50 Mtbr

B – rail de nuance dure. Rr ≃ 90 daN/mm²
retiré des voies après avoir subi un
trafic de 73 Mtbr

C – rail de nuance dure. Rr ≃ 96 daN/mm²
retiré des voies après avoir subi un
trafic de 160 Mtbr





(suite Fig. 28)

B

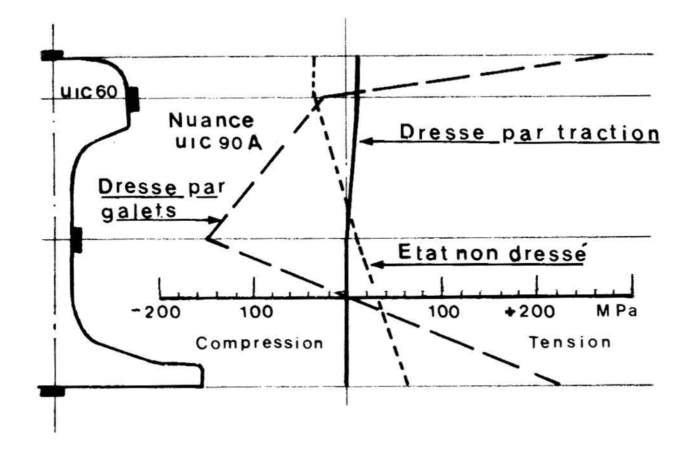


Fig. 29. — *Dressage par traction*

2.8. Efforts d'inscription en courbes

C'est essentiellement dans les courbes de faible rayon qu'un bogie peut exercer des efforts importants dans les rails. On se trouve alors dans une situation quasi statique ; le bogie peut prendre plusieurs positions, mais il marche généralement en crabe, les boudins des roues avant gauche et arrière droite dans le sens de la marche (fig. 30) exerçant un effort sur le rail. D'autre part, la vitesse périphérique de chaque roue faisant un angle avec la vitesse de progression du point de contact sur le rail, il en résulte un frottement de glissement à chacun des points de contact des quatre roues.

Le mouvement des bogies peut à chaque instant être décomposé en une translation dans la direction longitudinale du bogie et une rotation autour d'un point situé sur l'axe du bogie, et dont la théorie de NEUMANN permet de calculer la position.

La composante transversale du coefficient de frottement, seule accessible à la mesure, croît rapidement à partir de 0 en fonction de l'angle d'attaque Ψ de l'essieu, pour se stabiliser autour d'une valeur de l'ordre de 0,5 (fig. 31). Mais, les conditions d'humidité jouent un rôle très important dans la valeur de ce coefficient.

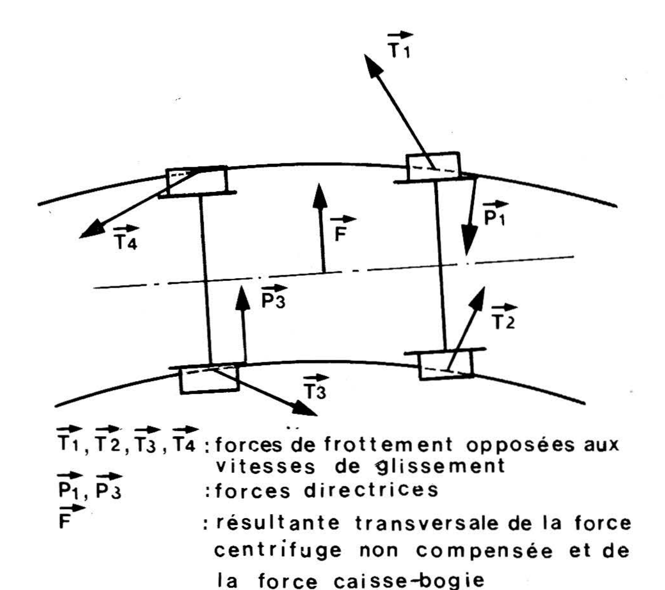


Fig. 30. — *Inscription d'un bogie en courbe*

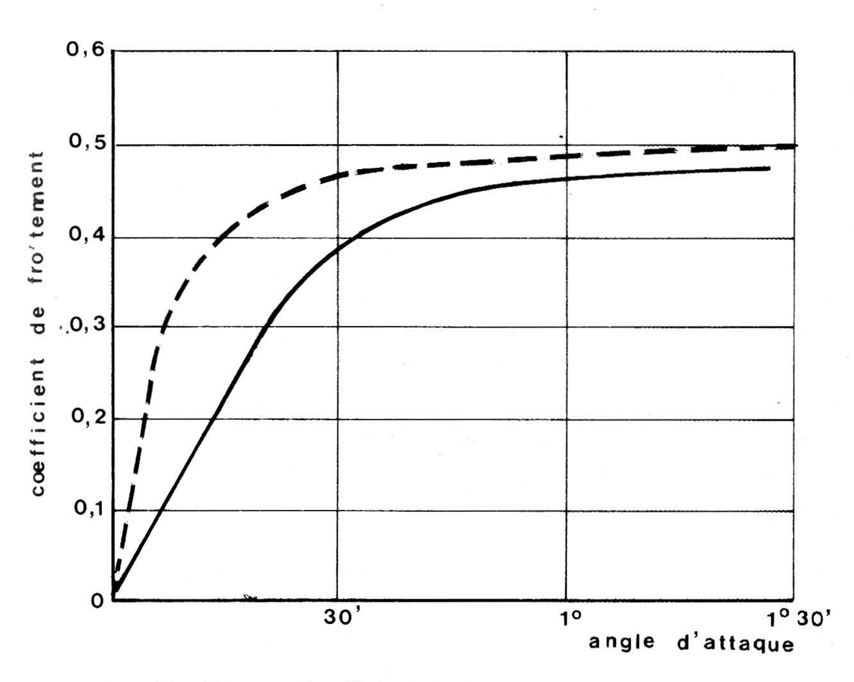


Fig. 31. — *Coefficient de frottement transversal*

Les résultats des calculs qui en résultent sont confirmés par les mesures des forces de guidage que l'on peut effectuer en voie. La SNCF a toutefois constaté une torsion du rail entre les deux premières roues, qui entraîne naturellement une augmentation des contraintes dans le champignon. Des efforts transversaux voisins de dix tonnes ont été mesurés par la SNCF pour certains types de machines agressives, conduisant à des contraintes de traction de l'ordre de 20 daN/mm² sur la face interne du champignon du rail. Dans l'âme, on a pu mesurer dans les mêmes conditions des contraintes voisines de 15 daN/mm². Les efforts transversaux sont sensiblement réduits lorsque le rail est humide, mais cet effet est de courte durée, la surface de roulement s'asséchant rapidement.

2.9. Contraintes dues aux joints et aux méplats

2.9.1. Un certain nombre de mesures faites en France ont montré la nocivité du joint pour ce qui concerne les contraintes. L'état de serrage des boulons et des tirefonds, la danse des traverses supports, ont une influence importante sur les résultats, et l'on peut, dans des cas extrêmes, trouver des contraintes (40 daN/mm²) supérieures à la limite de fatigue du métal. Mais, ce problème a perdu beaucoup de son importance du fait de la généralisation des longs rails soudés.

2.9.2. Le chapitre précédent évoque l'importance des chocs dus à la circulation de roues affectées de méplats. Ces chocs peuvent être à l'origine de ruptures fragiles pour des rails à faible résilience, surtout par temps froid. Mais, des essais effectués par le laboratoire de Derby ont également prouvé l'influence néfaste de ces chocs sur le développement des fissures de fatigue et, par conséquent, l'accélération des ruptures. Le choc engendre une onde de flexion qui se propage à 2 300 m/sec. et induit, à partir de 0,40 m du point d'impact et jusqu'à plus d'1,20 m de part et d'autre, des contraintes de tension dans le champignon. Il en résulte une augmentation du facteur d'intensité de contraintes qui accélère le processus de fissuration et abrège ainsi la durée de vie du rail.

2.10. Les contraintes superficielles sont au départ la conséquence d'un écrouissage dans l'opération de dressage qui modifie d'ailleurs légèrement la forme du rail par une diminution de la hauteur totale du rail et une augmentation de largeur du champignon et des patins de quelques pour mille, les cotes définitives restant cependant largement dans les tolérances de fabrication fixées par les cahiers des charges.

D'autre part, ainsi que nous allons le voir, le contact rail/roue introduit des contraintes qui, même limitées à celles qui sont prévues par la méthode de HERTZ, débordent largement du domaine élastique, d'où il résulte un nouvel écrouissage de métal dans la partie superficielle du champignon, qui entraîne les modifications de contraintes résiduelles que nous avons signalées, ainsi qu'une augmentation de la dureté de l'acier dans cette zone du rail. La fig. 32 montre l'augmentation du coefficient de dureté VICKERS dans la partie supérieure du champignon du rail, soumise à un écrouissage intense.

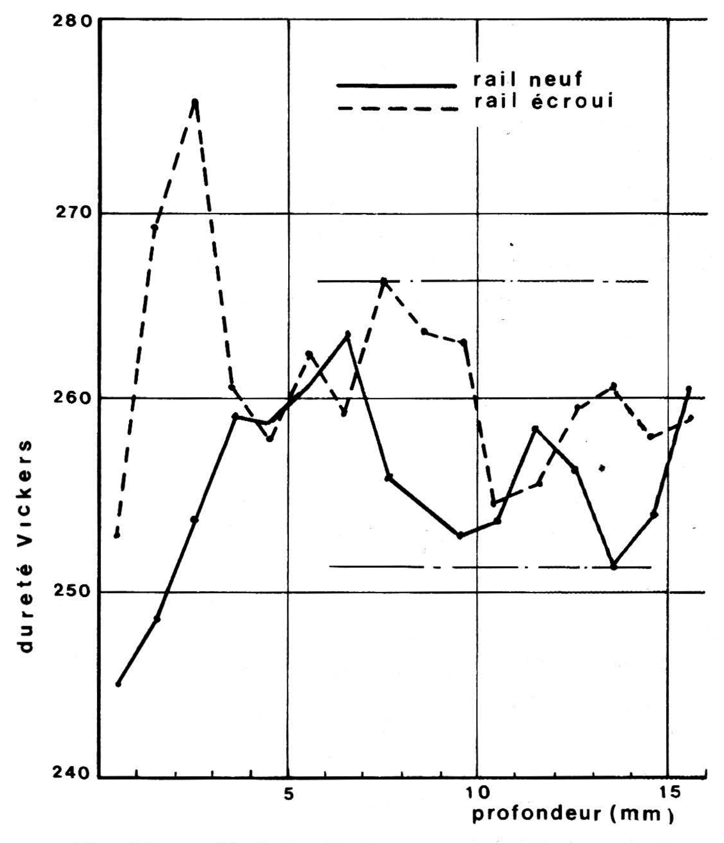


Fig. 32. — *Variation de la dureté avec la profondeur*

De même, des essais effectués par le laboratoire de recherches de DERBY (BR) ont mis en évidence un allongement (rolling out) du rail, dans les trois mois suivant sa pose, de l'ordre de 40 mm pour un kilomètre de rail, correspondant pour un LRS à une différence de température neutre d'environ 4 degrés.

2.11. En fait, le rail est surtout sensible à la fatigue et, en particulier, aux sollicitations ondulées dues aux passages des roues des convois. Le diagramme de GOODMAN/SMITH donne une idée des possibilités de résistance du rail à la fatigue. La fig. 33 correspondant au patin du rail présente le résultat d'essais effectués en Allemage avec des rails neufs de nuance 70 et 90 daN/mm². Elle montre que, pour une contrainte moyenne (contrainte thermique par exemple) comprise entre 20 et 40 daN/mm², l'amplitude de l'ondulation due au passage des essieux varie de 35 à 20 daN/mm², ce qui donne une large marge de sécurité. On constate toutefois que cette marge diminue par très basses températures. D'autre part, la corrosion du rail diminue encore cette marge de sécurité.

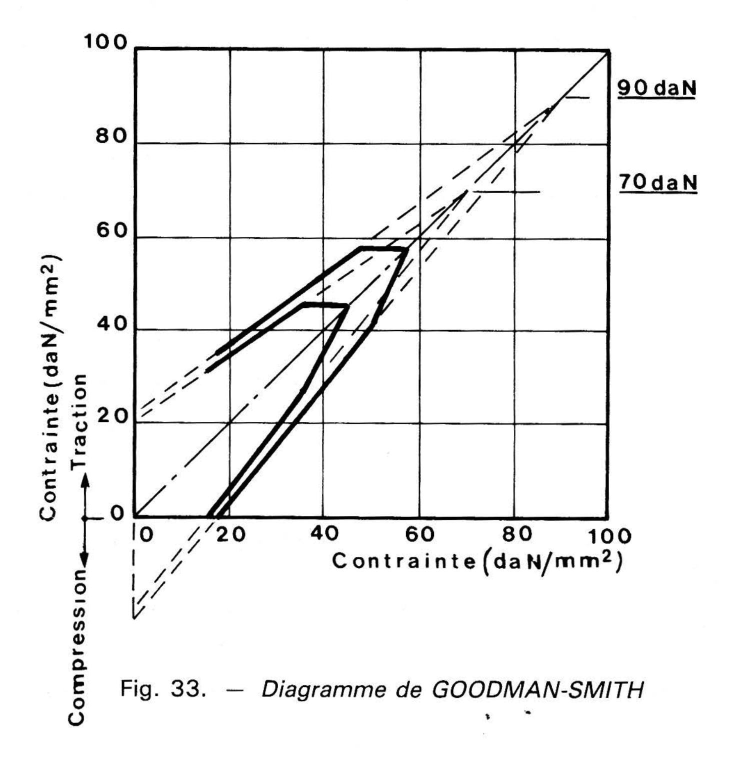


Fig. 33. — *Diagramme de GOODMAN-SMITH*

3. Le contact rail/roue

3.1. L'ensemble des considérations précédentes permet d'estimer l'ordre de grandeur des contraintes de tous ordres induites dans le profil du rail par le passage d'un essieu et, par conséquent, d'apprécier la capacité de résistance à la fatigue du rail considéré.

Mais, il faut considérer que des conditions très particulières règnent au point de contact de la roue sur le rail où une très petite surface de contact se trouve très fortement chargée et, par conséquent, sujette à des défauts de fatigue particulièrement graves. La charge de roue appliquée sur une surface de l'ordre de grandeur du centimètre carré est progressivement diffusée par l'ensemble des éléments constitutifs de la voie jusqu'à la plateforme, de façon à ne pas dépasser une contrainte compatible avec les qualités géotechniques du sol support. Il est donc intéressant de procéder à une analyse des contraintes de contact qui se produisent dans la partie supérieure du champignon. Certaines études ont montré que la dégradation des divers éléments de la voie était proportionnelle à une puissance α de la charge Q de roue, α décroissant avec la distance à la roue : si la fatigue du rail varie environ comme Q^3, la dégradation du nivellement ne varie que comme Q. On retrouve d'ailleurs une loi et des coefficients très comparables aux résultats de l'AASHO obtenus aux USA sur la fatigue des structures routières.

Au contact rail/roue, il se produit une déformation plastique qui finit par se stabiliser ; du fait de l'adaptation correspondante, il ne se produit plus ensuite que des déformations élastiques, d'où résulte la fatigue.

3.2. En supposant que l'on puisse rester dans le domaine des déformations élastiques, on peut appliquer la théorie de HERTZ au contact de la roue avec le rail. Il se produit une petite déformation au contact qui est en forme d'ellipse.

La pression au centre de l'ellipse est donnée par la formule de HERTZ :

$$q_0 = \frac{1}{\pi\mu\nu} Q^{1/3} \left(\frac{E}{1-\sigma^2}\right)^{2/3} \left[\frac{3}{8}\left(\frac{1}{\varrho_1} \div \frac{1}{\varrho'_1} \div \frac{1}{\varrho_2} \div \frac{1}{\varrho'_2}\right)\right]^{2/3}$$

$\pi\mu\nu$ sont des coefficients donnés par les tables de HERTZ,

E et σ sont le module d'élasticité de l'acier et son coefficient de Poisson,

Q est la charge de la roue,

$\varrho_1 \varrho'_1 \varrho_2 \varrho'_2$ sont les rayons de courbure principaux du rail et de la roue, dans deux directions perpendiculaires.

L'application de cette formule, dans le cas d'un bandage neuf à courbure nulle au point de contact, et d'un rail UIC 60 dont le rayon de courbure du champignon est de 300 m, pour une roue de 1,00 m de diamètre chargée à 10 tonnes, donne une pression de 110 daN/mm², les longueurs d'axes de l'ellipse de contact étant de 11 et 15,5 mm. Par contre, si le contact a lieu entre flanc du rail et boudin, l'ellipse de contact est beaucoup plus aplatie et l'on trouve une pression de l'ordre de 400 daN/mm².

On peut également calculer la contrainte de cisaillement maximale qui se trouve à quelques millimètres de la surface de contact. Cette contrainte est donnée par la formule :

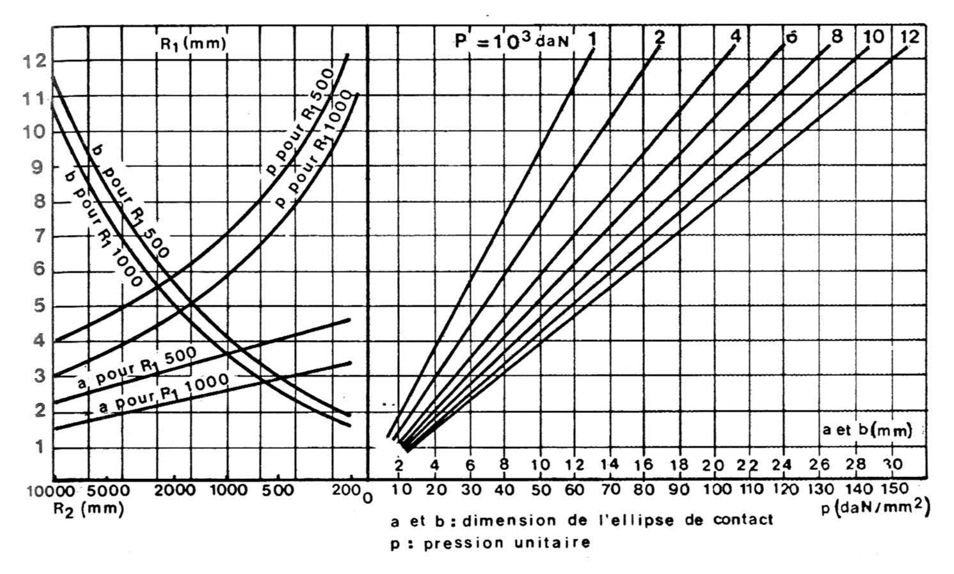
$$t = 85\, Q^{\frac{1}{3}} \frac{1}{r} \left[\left(\frac{1}{\varrho_r} - \frac{1}{\varrho_b} \right) \right]^{\frac{1}{3}}$$

r rayon de la roue,

ϱ_r rayon de la surface transversale du rail

ϱ_b rayon transversal du bandage.

Le diagramme de la figure 34, établi par GONON, permet de calculer les contraintes de pression au centre de l'ellipse, ainsi que les valeurs d'axes 2a et 2b de cette dernière pour des roues de 500 et 1 000 mm de diamètre, en fonction d'un quantité R2 égale au rayon transversal du champignon du rail si le bandage est neuf, et qui peut atteindre 400 m s'il est usé.



R_2 étant donné, on trace la verticale correspondante.
Des points de rencontre de cette verticale avec les courbes donnant a, b et p pour le diamètre de roue considéré, on trace des horizontales jusqu'aux points de rencontre avec la droite P choisie,
Les abcisses de ces points de rencontre donnent les valeurs de a, b et p

Fig. 34. — *Abaques de HERTZ*

Le cisaillement t est la contrainte la plus dangereuse dans un milieu fretté, ce qui est ici le cas. Pour que la déformation demeure élastique, il faut que t reste inférieur à la limite élastique en traction, minorée de 30 %, soit environ 30 daN/mm² pour un rail de nuance ordinaire.

Le cas le plus défavorable est celui du bandage neuf cylindrique ($\varrho_b = \infty$) roulant sur un rail UIC 60 ; ou tout autre, ayant atteint le profil d'usure ($\varrho_r = 300$ mm). Il faut donc :

$$\frac{Q}{r} < \left(\frac{30}{85}\right)^3 300 = 13 \text{ t/m}$$

ou $\dfrac{Q}{D} < 6{,}5$ t/m.

Avec des essieux de 20 tonnes, et des roues d'un mètre de diamètre

$$\frac{Q}{D} = 10 \text{ t/m.}$$

Il y a donc le plus souvent une déformation plastique.

Lorsque le bandage a atteint le profil d'usure $P_b = 400$ mm

$$\frac{1}{\varrho_r} - \frac{1}{\varrho_b} = \frac{1}{300} - \frac{1}{400} = \frac{1}{1\,200}$$

avec $\frac{Q}{D} = 10$ t/m

$t = 19$ daN/mm².

Cette valeur est encore voisine de la limite élastique en cisaillement.

On voit donc qu'en fait les contraintes sont dans le domaine élasto-plastique et que les formules de HERTZ ou de THOMAS et HOERSH qui s'appliquent au cas d'un demi-espace chargé sur une aire elliptique ne peuvent que donner une idée de l'importance des efforts, les déformations étant elles-mêmes limitées par l'effet de frettage produit par la masse du champignon. Les calculs correspondants, rapidement très complexes, n'offrent donc pas d'intérêt pratique. Il importe de souligner toutefois que, une fois l'écrouissage stabilisé, la limite de fatigue est multipliée environ par 2, et qu'il n'y a plus de problème ; encore faut-il que cet écrouissage soit atteint avant que n'apparaissent des écaillages.

3.3. De nombreuses tentatives d'approche par le calcul des contraintes et déformations à l'intérieur du champignon du rail ont été faites. Signalons par exemple celle de STREMSDOERFER qui a condensé dans son calcul des hypothèses compatibles de travail du rail à la flexion et des efforts de contact de HERTZ. Ce calcul, fort complexe, montre que, conformément aux résultats expérimentaux, le point de HERTZ où la contrainte de cisaillement est maximale, se dédouble soit sous l'action de flexions importantes, soit sous l'action d'une compression thermique (fig. 35). Les deux phénomènes ont donc une influence favorable.

Ces résultats sont néanmoins sujets à critique, ne serait-ce que dans la mesure où ils ne prennent en compte que des phénomènes élastiques.

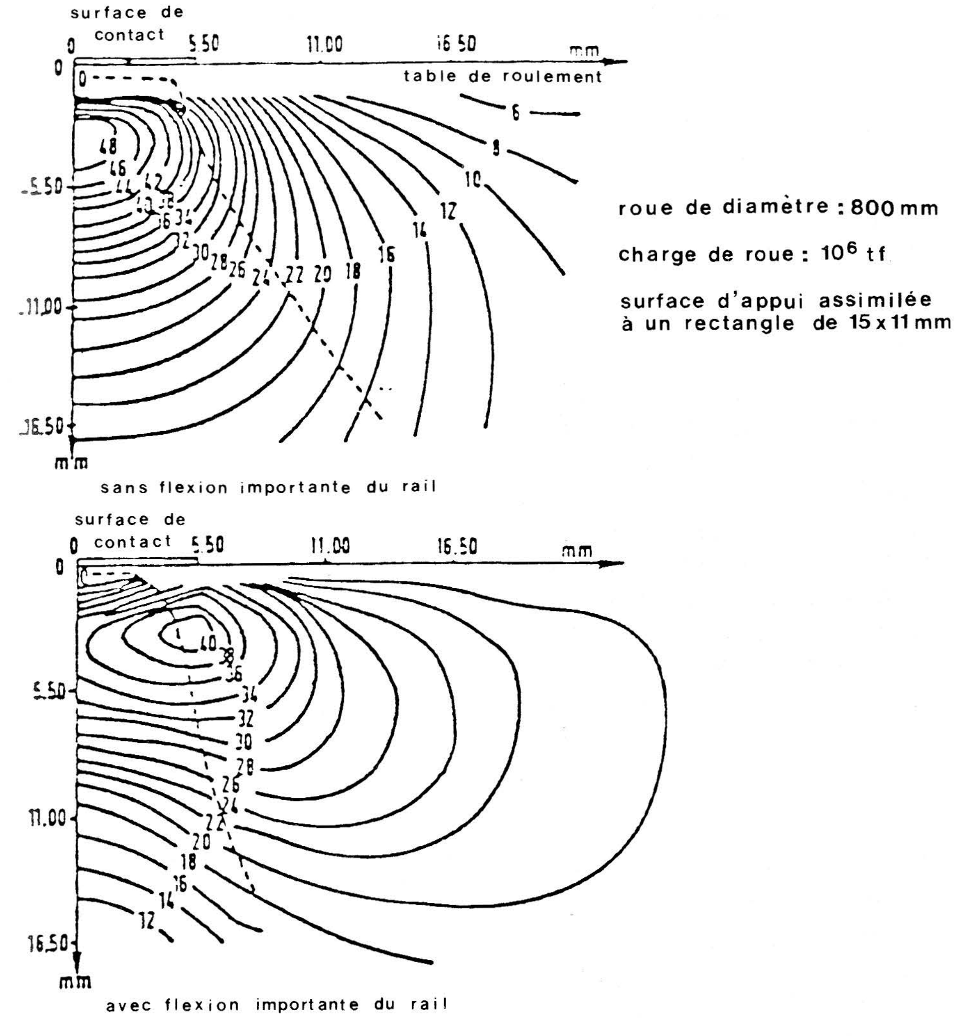


Fig. 35. — *Diagramme de STREMSDOERFER*

4. De l'ensemble des considérations précédentes, il ressort qu'il serait vain de vouloir établir un bilan significatif de l'ensemble des contraintes qui s'exercent sur le rail, et de tenter, par là, de définir, à partir d'un acier de qualités physiques données, les caractéristiques géométriques du rail capable de résister aux charges qui lui sont imposées. D'une part, les contraintes calculées ne revêtent qu'un aspect statistique, et ne sont donc pas susceptibles de s'additionner purement et simplement : par exemple, suivant la température, les con-

traintes qui en résultent s'additionnent aux contraintes résiduelles, elles-mêmes positives ou négatives, ou s'en retranchent ; les efforts d'inscription en courbe sont compensés par une moindre surcharge dynamique du fait d'une vitesse plus ou moins réduite ; les surcharges dynamiques sont elles-mêmes fonctions de l'état du nivellement ; elles peuvent être aggravées par une usure ondulatoire non maîtrisée. D'autre part, le rail étant soumis à des phénomènes de flexion alternée au passage des charges de roue, c'est la résistance à la fatigue qui doit être prise en compte, et non pas la limite élastique, ou la limite de rupture de l'acier : il faut faire intervenir les courbes de WOEHLER. La longévité d'un élément est en fait bien caractérisée par sa résistance au cisaillement alterné.

Bien entendu, toutes les considérations précédentes ne s'appliquent qu'à un rail en bon état, neuf, ou tout au moins dont l'usure n'a pas altéré le profil en travers de façon notable. Les contraintes ne peuvent donc qu'être accentuées dans le cas d'un rail déformé ou très usé. Le rail aplati ou chanfreiné subit des contraintes supérieures du fait de l'excentricité croissante des charges. D'où un premier intérêt d'une rectification du profil transversal du champignon, dont nous parlerons par la suite, permettant l'atténuation des contraintes.

Finalement, c'est par des considérations empiriques que sont actuellement définis les profils de rails utilisés sur des voies supportant un trafic déterminé : l'analyse statistique des retraits de rails de la voie pour avarie ou rupture est un outil beaucoup plus instructif que le calcul des contraintes pour le choix du profil de rail ad hoc.

5. Critères de DANG-VAN (3)

5.1. Il apparaît cependant nécessaire de s'étendre sur une étude élaborée en France, par DANG-VAN, et qui, dans le cadre de la mécani-

(3) Le lecteur pourra se reporter à l'article de MM. DANG-VAN et GENCE de la RGCF de décembre 1978.
Ce critère a été proposé par M. DANG-VAN, chercheur au Laboratoire de mécanique des solides de l'École polytechnique de PARIS, alors qu'il collaborait aux travaux du Comité C 53. Ces travaux, poursuivis pendant de nombreuses années, ont apporté beaucoup d'éclaircissements dans la compréhension des phénomènes de travail du rail. Le prix de la fondation WALLENBERG (Académie des sciences de Suède) a récompensé M. DANG-VAN en 1985.

que du solide, permet de mieux appréhender un "critère d'emploi du matériau rail", c'est-à-dire de déterminer dans quelles conditions l'état de tension en un point déterminé peut dépasser la limite de fatigue et entraîner le développement d'une microfissure à partir de défauts préexistants (inclusions non métalliques, flocons d'hydrogène).

Aucune des études citées précédemment n'explique la profondeur à laquelle prennent naissance les taches ovales, 4 à 5 mm dans la théorie de HERTZ au lieu de 10 à 15 mm dans la réalité. Il faut donc faire intervenir en particulier les contraintes résiduelles initiales et leurs modifications sous l'action des charges roulantes qui provoquent des phénomènes d'écrouissage et, par conséquent, une nette augmentation de la limite élastique. Ces contraintes résiduelles initiales résultent, nous l'avons vu, du refroidissement différentiel après laminage (d'où l'intérêt d'un profil le mieux équilibré possible) et du dressage. Rappelons que le champignon et le patin sont en tension et l'âme en compression. L'écrouissage au passage des roues transforme ensuite dans la zone de contact les contraintes initiales de traction en contraintes de compression. Il se produit finalement, si les contraintes ne sont pas excessives, un phénomène d'accommodation, auquel ne succèdent plus que des cycles élastiques de contraintes complexes. A ces contraintes s'ajoutent les contraintes d'origine thermique. Enfin, les inclusions non métalliques présentes dans l'acier à rail introduisent des concentrations de contraintes.

Les travaux du Laboratoire de mécanique des solides de l'École polytechnique de PARIS ont permis de préciser ces phénomènes.

5.2. Méthode de calcul proposée

Pour tenter d'expliquer les conditions dans lesquelles des fissures de fatigue peuvent se développer dans le champignon des rails à partir de microinclusions non métalliques à une profondeur de 10 à 15 mm sous la surface de roulement du rail, DANG-VAN a établi un modèle physique conduisant à une méthode de calcul permettant de déterminer, pour une nuance d'acier et un rail donnés, les contraintes maximales à partir desquelles commencent à apparaître des fissures de fatigue. Ce critère fait intervenir les contraintes microscopiques locales, et non les contraintes macroscopiques qui peuvent être sensiblement différentes.

Le principe du critère est le suivant : on trace, dans un plan représentatif des contraintes, qui est déterminé en fonction des critères admis pour expliquer le phénomène, les trajets de charges correspondant aux limites d'endurance de certaines sollicitations cycliques simples et l'on examine s'il est possible de trouver un domaine d'endurance susceptible de contenir tous les trajets jusqu'à leurs limites d'endommagement. Nous allons voir que DANG-VAN a trouvé un critère simple (relation linéaire entre le cisaillement et la pression hydrostatique), les limites d'endurance étant en outre bien représentées par deux droites. Ce critère est beaucoup plus satisfaisant que tous ceux qui avaient été proposés auparavant.

Sous réserve d'un cycle macroscopique élastique, il s'établit un cycle de contraintes locales tel que le plan de cisaillement le plus défavorable subisse un cisaillement alterné de même amplitude que celle des contraintes de cisaillement macroscopiques au point et dans le plan considéré, alors que la moyenne des contraintes principales, ou contrainte hydrostatique p, varie suivant le cycle macroscopique. L'amorçage des fissures se produit toujours sur des bandes de glissement intergranulaires, d'où le rôle joué par le cisaillement local dans le critère de DANG-VAN. D'autre part, une traction hydrostatique tend à ouvrir les fissures, une compression à les refermer, d'où l'intervention de la pression hydrostatique. Le critère prévoit donc qu'au moment de l'endommagement le cisaillement extrême local est une fonction (linéaire) de la pression hydrostatique concomitante. On admet que, dans ces conditions, la fatigue agit localement en deux phases dans les grains intéressés :

une phase d'écrouissage où les contraintes évoluent sous l'effet de déformations plastiques cycliques, pour tendre vers un état limite stabilisé (accommodation plastique),

et une phase d'amorçage des fissures dans les plans de glissement, due aux contraintes du cycle stabilisé, dans les grains qui sont déjà dans le domaine plastique.

Pour la première phase, on peut démontrer que les contraintes locales σ_{ij} . (t) sont reliées aux contraintes Σ_{ij}(t) de la Mécanique des milieux continus classique, par la formule :

$$\sigma_{ij}(t) = \Sigma_{ij} - \alpha_{ij} T_o$$

où α_{ij} est le tenseur d'orientation du grain :

$$\alpha_{ij} = \frac{1}{2} (n_i m_j + n_j m_i)$$

n est la normale du plan de glissement,
m la direction du glissement, et
T_o le cisaillement moyen, demi-somme des contraintes de cisaillement maximale et minimale au cours du cycle.

Dans la deuxième phase, la fatigue se développe avec le nombre de vides dans le réseau cristallin. Les lacunes, qui se forment ainsi au cours de l'écrouissage, augmentent considérablement avec ce dernier. Il en résulte une variation de volume qui justifie le rôle de la pression hydrostatique dans l'étude du phénomène de fatigue.

C'est à partir de ces considérations qu'un modèle mathématique schématisant le comportement du matériau à la fatigue a pu être construit en évaluant le cisaillement local et la pression hydrostatique dans le cycle stabilisé pour les différents trajets envisagés, et il est possible de proposer, à partir de ce modèle, un critère pratique permettant d'unifier de façon satisfaisante les limites d'endurance.

Les cycles de contraintes macroscopiques imposés $\Sigma_{ij}(t)$ étant connus, on détermine aux points critiques le plan qui subit les amplitudes de cisaillement maximal, d'où n, m et α_{ij}.

La pression hydrostatique locale est

$$p(t) = \frac{\sigma_{kk}(t)}{3} = \frac{\Sigma_{kk}(t)}{3}$$

On trace le trajet de charge dans le plan $\tau(t)$ en fonction de p(t). L'expérience montre que le domaine d'endurance est convenablement délimité par deux droites symétriques par rapport à l'axe des p.

L'application d'un tel critère suppose donc connus le diagramme représentant les droites d'endommagement, et les trajets de charge.

5.3. Le tracé des droites limites se fait à partir d'essais de fatigue simples, torsion simple où la droite est confondue avec l'axe des ordonnées, et contraintes uniaxiales de traction ou de compression, représentées par des droites d'équation :

$$\tau = \frac{3}{2} p - \frac{\sigma_m}{2}$$

σ_m désignant la valeur moyenne autour de laquelle oscille la contrainte (σ_m est nulle dans les cas de traction ou de compression alternées, le cycle de charge passant par l'origine).

L'Institut de Recherches de la Sidérurgie a exécuté, pour le compte de la SNCF, des essais de fatigue sur un certain nombre de nuances d'acier à rail. La figure 36 reproduit, dans le cas de rails de qualité courante, les diagrammes qu'il a été ainsi possible d'établir.

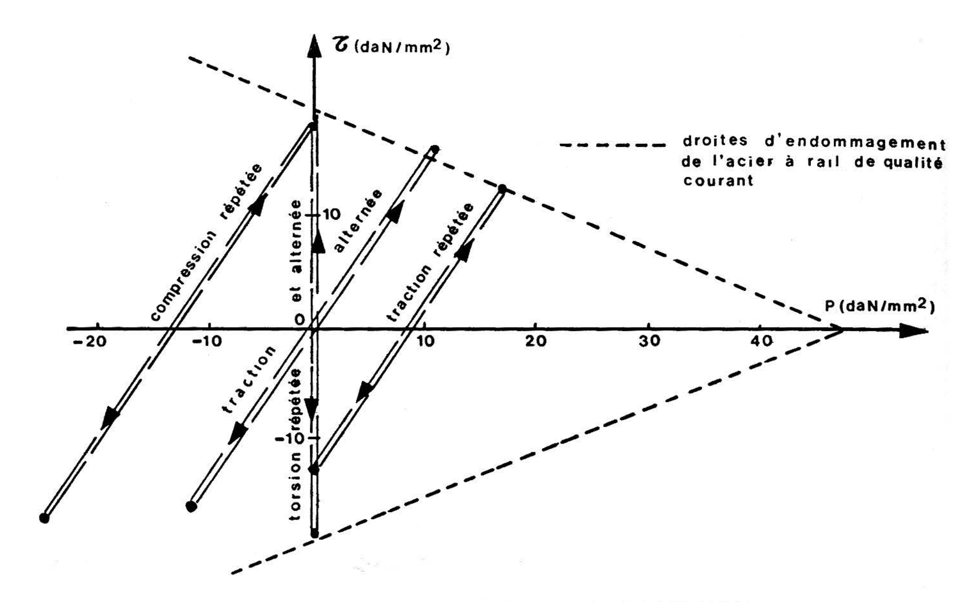


Fig. 36. — *Critère de fatigue de DANG-VAN*

Les essais effectués ont permis de déterminer expérimentalement les coefficients de l'équation de la droite d'endommagement (Tableau 7)

$\tau = - ap + b$

p et τ en daN/mm².

QUALITÉ D'ACIER	R	a	b
Qualité courante	76.2	0,311	18,84
Acier naturellement dur	93.6	0,568	23,20
Acier allié au Cr	109	1,05	29,57

TABLEAU 7

a et b croissent donc avec la nuance d'acier. Une augmentation de la dureté correspond à la fois à une translation de la droite d'endommagement vers les τ supérieurs et à une rotation de cette droite qui élargit sensiblement le domaine d'endurance vers les fortes compressions hydrostatiques. b diminue également sensiblement avec le nombre de cycles de contraintes.

Un acier à rail de nuance plus élevée possède donc des limites d'endurance également plus élevées : il apparaît comme nettement favorable pour limiter l'amorçage des défauts de fatigue. L'avantage est beaucoup plus sensible pour les défauts superficiels que pour les défauts profonds. Un acier dur sera donc particulièrement conseillé dans le cas d'emploi de roues de faible diamètre, génératrices de défauts peu profonds.

D'autre part, un relèvement de la nuance d'acier entraîne une augmentation de la limite d'écoulement macroscopique en cisaillement simple, et réduit ainsi le risque de ruine du champignon par déformation plastique.

5.4. Le tracé des cycles de charge a été établi par le calcul pour un rail de profil et de nuance donnés, en fonction de la profondeur dans le champignon. Les paramètres pris en compte sont la charge appliquée au point de contact avec le rail, le diamètre de la roue et son rayon de courbure transversal, et enfin le module de voie.

Les calculs du Comité C 53 de l'ORE ont montré que le plan de cisaillement le plus défavorable est incliné à 30 degrés sur la verticale.

Les calculs ont été menés en évaluant les contraintes dans le plan de symétrie du rail à une distance du centre de l'ellipse de contact suffisamment petite pour que les contraintes de HERTZ y soient encore notables, mais hors de la zone de déformations plastiques.

Les contraintes prises en compte sont :

— les contraintes de HERTZ, évaluées à partir des formules de THOMAS et HOERSCH ;
— la flexion du rail sur le ballast ;
— la flexion du champignon sur l'âme ;
— les contraintes résiduelles dans les trois directions ;
— les contraintes longitudinales d'origine thermique.

Nous ne reviendrons pas sur les modes de calcul de ces diverses contraintes, déjà esquissés au début du présent chapitre.

L'application du critère proposé conduit à tracer des courbes reliant le cisaillement sur le plan le plus défavorisé à la pression hydrostatique. Le nombre des paramètres et la complexité des équations nécessitent le recours à un ordinateur équipé d'un traceur de courbes. La figure 37 donne, à titre d'exemple, pour diverses profondeurs dans le champignon, les cycles de cisaillement sur un plan incliné à 30° sur la verticale en fonction de la pression hydrostatique que subit un rail UIC 60, sur 30 mm de part et d'autre du point de contact, lorsqu'il est chargé par une roue de 1 250 mm de diamètre, pesant 10,5 t, avec un module de voie de 4.10^7 N.m^{-2}.

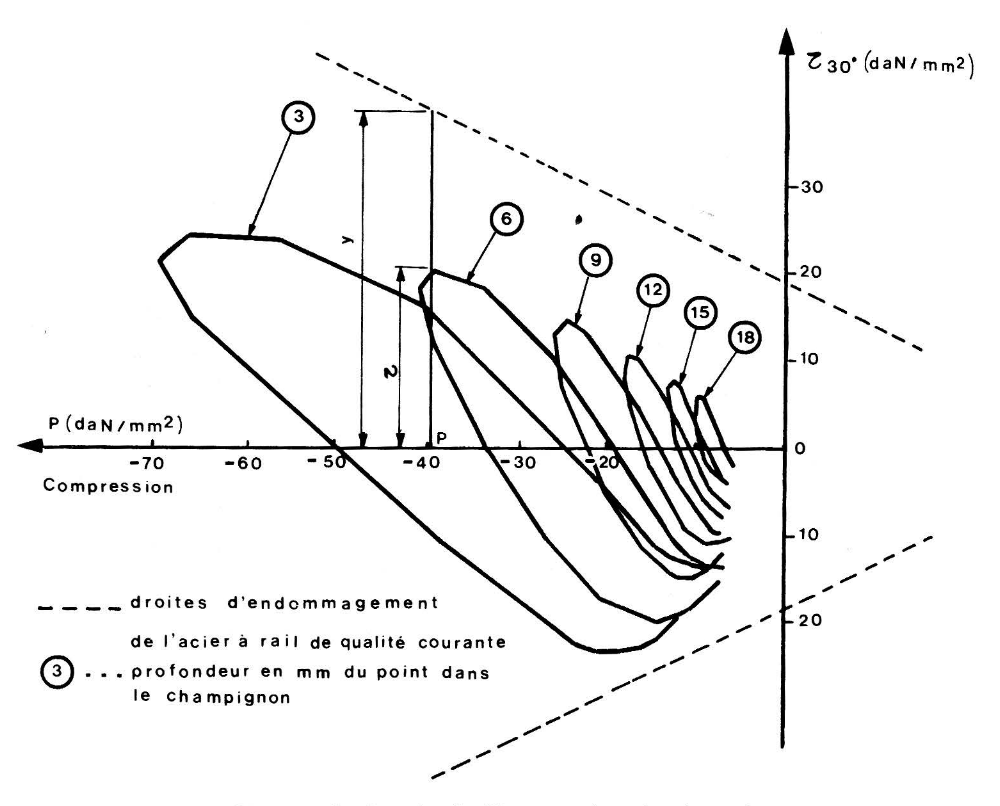
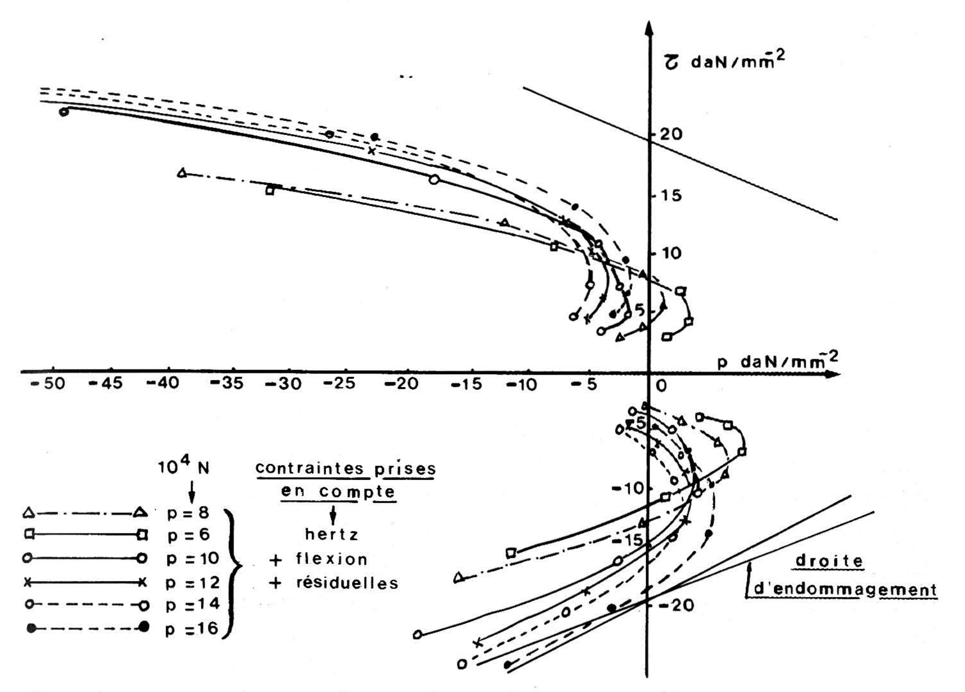


Fig. 37. — *Cycles de cisaillement dans le champignon*

5.5. On peut tirer des conclusions intéressantes de ces études. Le tracé à diverses profondeurs dans le champignon d'un rail U 50 des courbes enveloppes des cycles de cisaillement sur un plan incliné à

30° provoqués sur 30 mm de part et d'autre du point de contact par une roue de 830 mm de diamètre, munie d'un bandage neuf et chargée à des valeurs comprises entre 8 et 14.10⁴ N (fig. 38), montre que le point de tangence des droites d'endommagement et des courbes enveloppes des cycles de cisaillement les plus agressifs correspond à une profondeur dans le champignon de l'ordre de 12 à 15 mm. Ce résultat, très important, recoupe exactement ceux fournis par l'expérience.



Sur chaque courbe enveloppe, les points figuratifs correspondent respectivement en allant de l'extrémité basse vers l'extrémité haute, aux profondeurs Z = 3, 6, 9, 12, 15 et 18 mm.

Fig. 38. — *Courbes enveloppes des cycles de cisaillement*

On note également que la position relative des courbes enveloppes des cycles de contraintes et des droites limites traduit la nocivité de ces contraintes. Ceci permet de définir le danger d'endommagement par fatigue comme le quotient α_f, pour un couple de contraintes ($p\tau$) données, du cisaillement τ lu sur la courbe par la coordonnée y cor-

respondant au même cisaillement, lue sur la droite d'endommagement. Ce rapport reste compris entre 0 et 1, si aucun point du cycle ne sort du domaine de non-endommagement.

L'étude faite montre que la profondeur du point de danger maximal diminue avec le diamètre des roues. En fait, les roues de petit diamètre provoquent non une ruine du rail par fissuration transversale amorcée en profondeur, mais un fluage suivi d'écaillage des couches superficielles. Il faut fonc utiliser dans ce cas précis non le coefficient de danger par fatigue α_f, mais le coefficient de danger de ruine par fluage α_p, qui est toujours supérieur à α_f.

Enfin, le critère DANG-VAN, comme nous le verrons plus loin, permet de mieux apprécier la relation limite devant exister entre charge et diamètre de roue (paragraphe 7).

5.6. *Applications pratiques (travaux du Comité ORE C 113)*

L'application du critère de DANG-VAN a été effectuée dans le cas de diverses nuances d'acier à rail. La figure 37 présente les cycles complexes correspondant au passage d'une roue de véhicule ferroviaire de diamètre 1,250 m (bandage neuf, chargée à 180 KN, sur un rail de profil UI 60 posé sur une voie de module 4.10^7 N/m². Les trajets de chargements complexes subis par le rail ont été tracés en fonction du type de sollicitation considéré à l'aide d'un ordinateur, en des points du champignon du rail, situés à différentes profondeurs. On a reporté en ordonnée l'amplitude du cisaillement local, $\tau_{30°}$ calculé sur des plans inclinés à 30° sur la verticale, sur lesquels l'amplitude du cisaillement est maximale. Cette inclinaison est en parfait accord avec l'orientation du plan moyen du développement des fissures de fatigue (tache ovale).

Les cycles, complexes, sont situés dans le domaine de la compression hydrostatique et, comme on pouvait s'y attendre, les contraintes sont plus importantes en surface qu'en profondeur.

Le tracé de ces cycles, pour un grand nombre de cas de charges, a permis de dégager les conclusions suivantes :

— l'augmentation de la charge de roue a une influence défavorable en surface et en profondeur,

– la diminution du diamètre de roue est néfaste, et a plus d'influence en surface qu'en profondeur,
– un bandage présentant un profil d'usure transversal (concave) est très favorable, surtout en surface, et cela d'autant plus que les roues sont petites (ce qui peut présenter des inconvénients par ailleurs),
– les contraintes résiduelles ont une incidence favorable en surface, où règne une compression hydrostatique élevée : en déplaçant les cycles vers les compressions hydrostatiques, elles les éloignent des droites d'endommagement. Par contre, en profondeur, dans une zone qui correspond sensiblement à celle où naissent les taches ovales, c'est le contraire qui se produit, puisque la pression hydrostatique y présente un pic de traction, les contraintes d'origine thermique agissent comme les contraintes résiduelles, en translatant les cycles complexes parallèlement à l'axe des p, et sont donc favorables en été et défavorables en hiver.

6. Calcul du profil

6.1. La méthode de DANG-VAN permet d'apprécier l'influence des phénomènes de fatigue dans la zone du champignon où prennent naissance les fissures correspondantes. Nous avons par ailleurs fait état des résultats de l'application au rail des formules classiques de la résistance des matériaux. Mais, celle-ci ne permet pas, compte tenu de la complexité du problème, et en particulier de la forme du rail, de connaître la répartition des contraintes à l'intérieur du profil, en particulier dans les zones soumises à des sollicitations importantes, par exemple les congés de raccord entre âme et champignon, et âme et patin.

Le procédé extensométrique permet cependant de mesurer expérimentalement les contraintes statiques ou dynamiques, mais uniquement sur la surface du rail.

Deux méthodes, l'une expérimentale, l'autre théorique, mais limitées au domaine statique, permettent par ailleurs d'analyser la répartition des contraintes à l'intérieur du profil, la photoélasticimétrie et la méthode des éléments finis.

6.2. Photoélasticimétrie

6.2.1. La photoélasticimétrie à deux dimensions est relativement simple et rapide. En effet, si l'on ne dépasse pas la limite élastique, la répartition en direction et en grandeur des contraintes d'une pièce soumise à des efforts est indépendante de la matière utilisée. On peut donc déterminer les contraintes existant à l'intérieur d'un profil plan en réalisant un modèle de contour identique, mais taillé dans une lame de substance transparente, isotrope au repos et douée de biréfringence lorsqu'on lui applique des efforts. Ceux-ci doivent être analogues en grandeur et direction à ceux supportés par la pièce. Cette biréfringence accidentelle est liée, en chaque point de la lame, aux direction et grandeur des contraintes en ce point. Par ailleurs, on démontre que les axes optiques, en chaque point du modèle, prennent les directions des contraintes principales.

Un modèle en vraie grandeur du profil du rail à étudier est découpé avec soin dans un matériau optiquement sensible (en général une plaque d'araldite de 10 mm d'épaisseur) et placé sur le banc de photoélasticimétrie dans un châssis de mise en charge simulant la situation en voie (c'est-à-dire incliné suivant un angle de 1/20).

On observe alors sur l'écran des lignes d'interférence semblables à celles de la figure 39. Les courbes représentent les positions d'égale différence entre les contraintes principales, c'est-à-dire les contraintes de cisaillement. Pendant le temps de mise en charge du modèle, on voit les courbes de niveau se déplacer à partir des régions de sollicitation maximale. La contrainte de cisaillement en un point quelconque est proportionnelle au nombre de franges compté à partir d'une surface non sollicitée, ou au fur et à mesure qu'elles apparaissent sur l'écran pendant l'application de la charge. Les valeurs de franges peuvent être converties en valeurs absolues de contraintes dans un rail en tenant compte de la différence entre le module de YOUNG du matériau constituant le modèle et celui de l'acier ; mais, comme le modèle ne tient pas compte des contraintes de flexion appliquées perpendiculairement à son plan, on se borne à la mesure du nombre de franges et on établit, en partant de là, de simples comparaisons entre différents profils pour différentes charges.

Les résultats peuvent être reportés sur un graphique donnant les variations du nombre de franges de la surface à certains niveaux du rail en fonction de l'excentricité de la charge. Ces graphiques, tracés pour différents points et pour chaque profil considéré, permettent d'effectuer les comparaisons utiles.

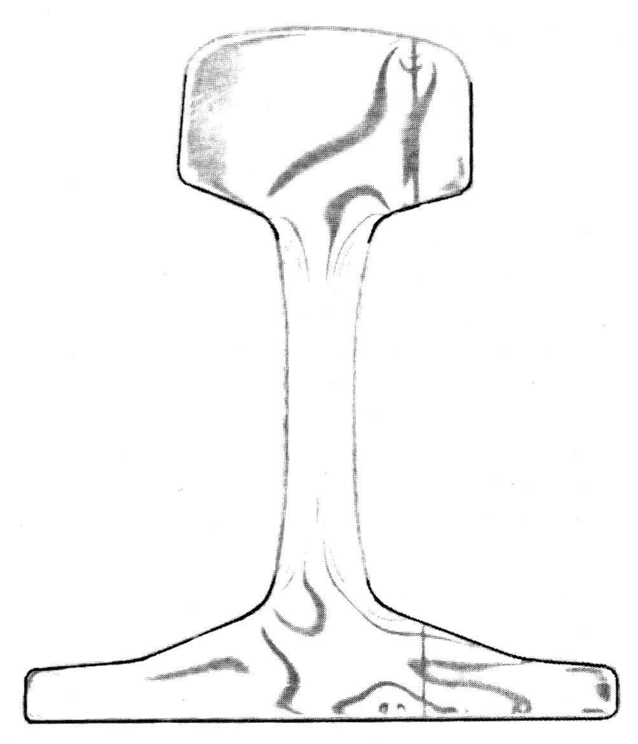


Fig. 39. — *Photoélasticimétrie*

On conçoit facilement les limites d'une telle étude qui ne reproduit que très imparfaitement la réalité. En particulier, elle ne prend en compte ni torsion du champignon, ni un point d'inflexion dans la déformée de l'âme en cas de charge excentrée. Elle ne prend pas non plus en compte, bien évidemment, la répartition de la charge sur une certaine longueur de champignon. Cependant, peu coûteuse, elle permet d'analyser les conséquences de modification du profil, et en particulier d'optimiser les rayons de raccord âme-champignon et âme-patin qui sont des points très sensibles de concentration des contraintes, phénomène qu'elle met bien en évidence. Les essais avec charge excentrée montrent une augmentation de contraintes dans la zone de raccord âme-champignon ; les efforts horizontaux agissent de leur côté sur le raccord âme-patin.

6.2.2. La méthode photoélasticimétrique a été étendue au domaine à trois dimensions : on reproduit un modèle de coupon de rail en araldite, en général à l'échelle 1/2. A cet effet, on coule dans un moule en aluminium un coupon composé d'un mélange d'araldite et de durcisseur. Le modèle est ensuite maintenu sous charge, à 135 degrés, puis refroidi lentement pour figer les contraintes. On peut alors découper des tranches que l'on analyse en bidimensionnel. On peut obtenir ainsi sur le contour du profil les contraintes tangentielle et verticale σ_t et σ_z, ainsi que les contraintes σ_x le long de l'axe vertical du rail.

C'est une méthode délicate et coûteuse, d'une précision insuffisante pour des profils voisins. Or, il est souvent intéressant de procéder à l'amélioration d'un profil par légères retouches successives. Cependant, les résultats donnés par la photoélasticimétrie coïncident avec ceux qui résultent de l'application de la méthode des éléments finis, ce qui permet de valider simultanément les deux procédés.

6.3. Extensométrie

Dans la méthode par extensométrie, on dispose sur le pourtour du coupon de rail à analyser un certain nombre de jauges de contraintes (deux en chaque point de mesure, l'une parallèle à l'axe du rail, l'autre perpendiculaire) dont les déformations, dans un cas de charge donné, permettent de mesurer l'évolution des efforts à partir de l'état initial de repos. Les contraintes longitudinales et transversales σ_l et σ_t sont données à partir des déformations ϵ_l et ϵ_t correspondantes par la formule

$$\sigma_i = \frac{E}{1 - \nu^2} (\epsilon_i + \nu\epsilon_j)$$

E : coefficient d'élasticité de l'acier (20 000 Hbars)
ν : coefficient de Poisson (0,3).

Le cisaillement est égal au plus grand rayon des cercles de MOHR au point considéré.

Les jauges doivent être resserrées dans les zones à variations de contraintes rapides, c'est-à-dire dans les congés de raccordement.

Cette méthode est précise, mais coûteuse ; elle ne permet cependant que d'apprécier les contraintes en surface et nécessite pour chaque étude l'utilisation de modèles difficiles à retoucher.

En fait, dans leur ensemble, les méthodes se complètent bien et permettent de procéder à des vérifications. C'est ainsi que l'on a obtenu une excellente concordance entre la méthode par éléments finis et les mesures extensométriques (fig. 40). On dosera leur application suivant le problème posé : étude d'un profil nouveau, ou amélioration d'un profil existant. La gamme de ces derniers dans le monde est d'ailleurs telle qu'il paraît préférable de partir de certains d'eux bien connus par l'usage et d'y apporter par retouches les modifications nécessaires pour obtenir une meilleure répartition des efforts.

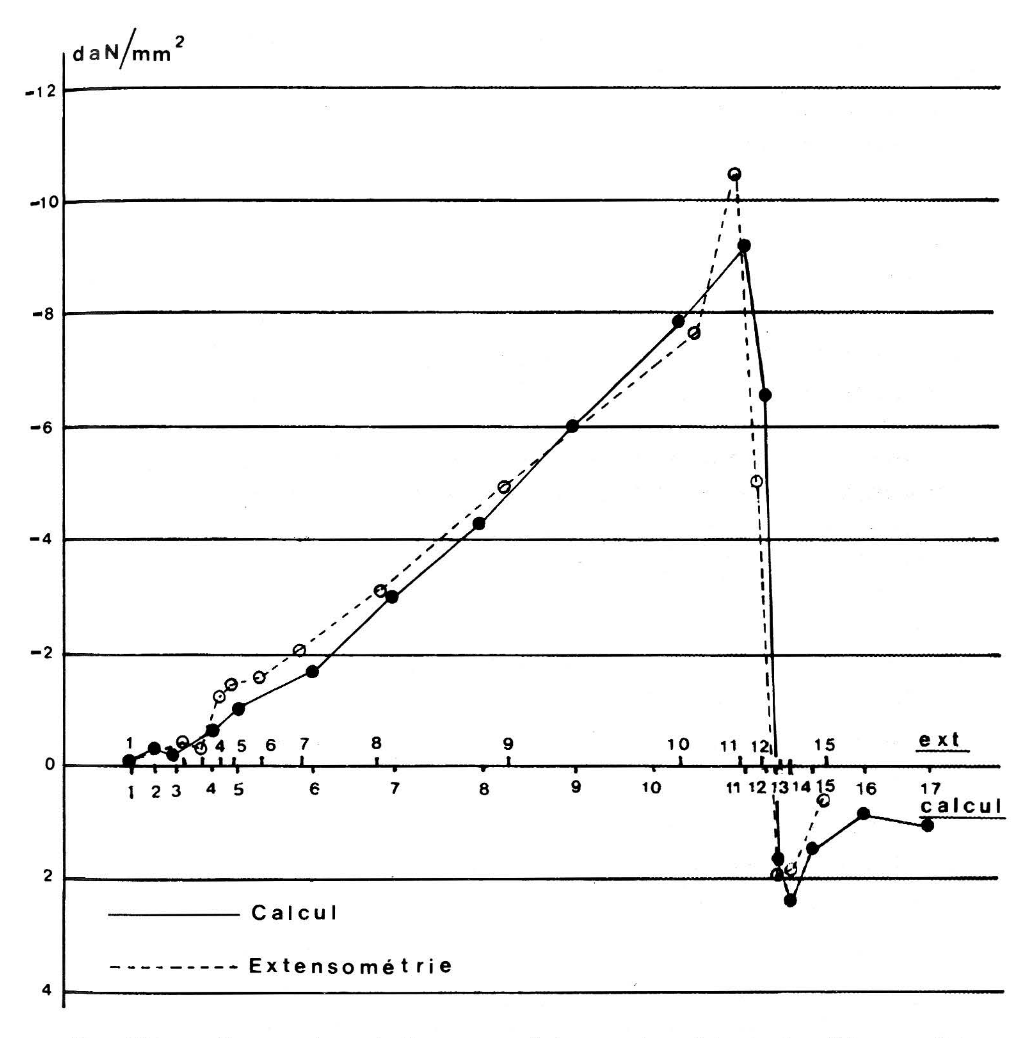


Fig. 40. — *Comparaison de l'extensométrie avec la méthode des éléments finis*

6.4. La méthode des éléments finis

6.4.1. Rappelons que la méthode des éléments finis consiste à découper le solide à étudier en éléments de formes géométriques simples par un maillage aussi serré que possible, en particulier dans les zones à variations rapides de contraintes. L'égalité des contraintes et des déformations sur les frontières communes à deux éléments voisins permet d'établir un système d'équations linéaires, dont la résolution nécessite le recours à un ordinateur du fait du nombre élevé des inconnues. A l'intérieur de chaque élément du maillage, les variations de contraintes sont données par des formules d'interpolation, souvent linéaires. Cette méthode permet d'aborder le domaine plastique qui nécessite, au moins dans certaines zones, un maillage plus serré, et éventuellement permet l'analyse des phénomènes dynamiques.

6.4.2. Le comité C138 de l'ORE a procédé à un calcul, dans le domaine élastique pour éviter un maillage trop serré. Un élément de rail de 50 cm de longueur a été décomposé longitudinalement en 5 éléments, et transversalement en 23 éléments. Chaque élément comporte 8 faces. Chaque face a 4 côtés avec un total de 8 nœuds (4 à chaque angle et 4 intermédiaires). Des efforts sont appliqués aux extrémités de l'élément pour simuler la continuité du rail.

Le rail est supposé reposer verticalement et transversalement d'une manière élastique sur la traverse, sur une longueur de 75 mm.

Le calcul a été fait dans différents cas de charge Q/Y (Q charge verticale et Y charge transversale), avec chargement soit asymétrique, soit décalé sur le côté.

Les résultats sont donnés sous forme des isobares de compression maximale + 10 Hbars, et de cisaillement maximal + 10 Hbars, rapportés au plan QY.

La proportionnalité liée à l'élasticité permet ainsi de calculer les contraintes dans tous les cas de chargement.

On constate que les contraintes sont maximales sur la surface du rail. Quand Y est faible, les plus grandes valeurs de traction apparaissent dans le patin ; par contre, pour une valeur plus importante de Y, le champignon est plus sollicité que le patin.

Le résultat global montre que, pour les charges traditionnelles (roues de 10 t), les contraintes ne dépassent pas des valeurs comprises entre 10 et 15 Hbars.

6.4.3. Le calcul par éléments finis se révélant très onéreux, M. DUBBELDAM, des Chemins de fer néerlandais, a établi un modèle analytique simplifié qui donne des résultats très voisins de la méthode précédente et permet donc sans risque d'erreurs d'étendre le champ d'applications de la méthode. Les études ainsi menées ont permis d'apprécier l'incidence de divers paramètres :

- Les tensions maximales diminuent sensiblement lorsque les raideurs verticale et horizontale du support augmentent (30 % environ lorsque l'on passe de 1 à 5.10^7 N/m). Mais, rappelons que les charges dynamiques dues aux oscillations des masses non suspendues augmentent rapidement avec la vitesse, et ce d'autant plus que la rigidité de la plateforme est élevée, d'où la nécessité d'un compromis.
- Les contraintes augmentent d'environ 10 % lorsque le travelage passe de 60 à 70 cm.

Tous ces résultats ont été dans l'ensemble confirmés par des mesures faites sur banc d'essai.

Bien entendu, il convient d'ajouter aux contraintes ainsi calculées les contraintes résiduelles, celles d'origine thermique, et éventuellement les contraintes dans les joints, dans la mesure où cette addition ne conduit pas à dépasser la limite élastique.

Par contre, les contraintes de HERTZ, situées dans la zone de contact, n'interviennent pas ; il s'agit de deux domaines d'études entièrement distincts, les contraintes de HERTZ n'intéressant que la partie supérieure du champignon.

6.5. Le comité ORE D120 a étudié le profil de rail lourd 71 kg, en mettant à profit ces diverses méthodes.

Les essais en photoélasticimétrie à 2 dimensions ont été faits au moyen de blocs d'araldite de 10 mm d'épaisseur dans divers cas de charges.

L'analyse photoélasticimétrique en 3 dimensions a été faite suivant le processus indiqué plus haut.

Les essais extensométriques sur coupons réels obtenus par rabotage de blooms ont été exécutés à l'aide d'une machine de MOORE. Les mesures réalisées avec des jauges de contraintes disposées sur la surface d'un coupon de rail de 3,30 m de longueur n'ont pas montré de différences sensibles avec la photoélasticité.

Enfin, dans l'analyse par la méthode des éléments finis, le rail a été découpé en 56 sections transversales sur 3 longueurs, soit 168 éléments (fig. 41) de forme prismatique à bases carrées ou rectangulaires. Le critère de plasticité de VON MISES a été appliqué.

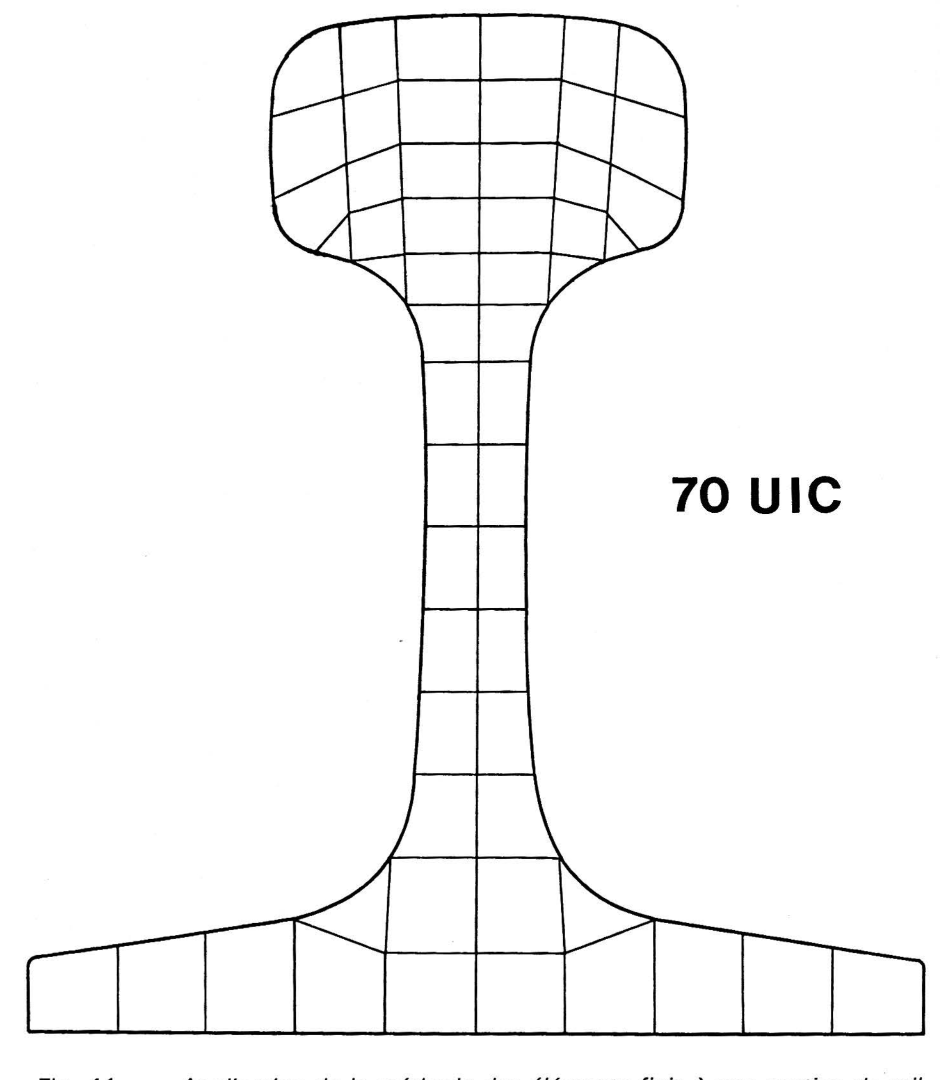


Fig. 41. — *Application de la méthode des éléments finis à une section de rail*

L'application des diverses méthodes décrites ci-dessus permet donc une analyse satisfaisante de la répartition des contraintes à l'intérieur d'un rail et, par conséquent, d'apprécier l'incidence de retouches locales en vue d'optimiser le profil.

7. Influence du diamètre des roues

On peut avec les formules de HERTZ calculer la contrainte de cisaillement maximale située à quelques millimètres de la surface de contact et qui est la plus dangereuse en milieu fretté, et en déduire la valeur limite du rapport Q/D, Q étant la charge de roue, et D son diamètre. Certains auteurs ont préconisé l'emploi de $\frac{Q}{\sqrt{D}}$. Mais, dans la gamme des valeurs utilisées, la différence entre les deux formules n'est pas significative.

L'application de ces formules, dans le cas d'un bandage et d'un rail neufs, conduit, pour un cisaillement limite de 30 daN/mm², à $\frac{Q}{D} < 5{,}5$ t/m.

Or, avec des essieux de 20 t et des roues d'un mètre, on trouve couramment $\frac{Q}{D} = 10$ t/m. A l'heure actuelle, le diamètre de roue minimal est dans quelques cas de 600 mm. En Europe, le rapport $\frac{Q}{D}$ ne va guère au-delà de 11. Quelques difficultés semblent parfois se présenter à partir de 12. Toutefois, la ligne des Braunkohlenwerke (4) va bien au-delà ($\frac{Q}{D} = 19$), avec des rails UIC 60 de nuance A dans les alignements seulement ; dans les courbes, des rails de résistance à la traction beaucoup plus élevée deviennent indispensables. Des valeurs élevées de $\frac{Q}{D}$ sont également adoptées par les réseaux américains où l'on atteint couramment 14 ou 15, quelquefois même

(4) Ligne privée de transports de lignite à 36 t par essieu.

16 et 18, mais alors au prix d'une sensible diminution de la durée de vie du rail. Il convient cependant de souligner que les rails américains sont d'une nuance d'acier dure. Le critère de DANG-VAN a permis une approche moins empirique du problème, traité au sens du Comité C113 de l'ORE.

Par application de ce critère, on peut tracer, dans un plan d'abscisse diamètre des roues et d'ordonnée la charge admissible, les courbes d'égal danger d'endommagement par fatigue. Ce danger α_f est, pour un couple donné pression hydrostatique-cisaillement, le rapport du cisaillement lu sur la courbe enveloppe du cycle au cisaillement correspondant de la droite d'endommagement.

Les courbes de la figure 42 ainsi tracées permettent de définir avec plus de rigueur que les diverses formules empiriques, la liaison devant exister entre diamètre et charge de roues maximale. Ces courbes justifient d'ailleurs un critère de la forme $P/D^n = C^{te}$, avec $n < 1$, d'où l'intérêt éventuel de $P/\sqrt{D}$, mais encore faudrait-il déterminer la valeur de la constante n en fonction de la nuance de l'acier à rails.

8. Influence du trafic et de la charge par essieu

8.1. L'ensemble des statistiques d'avaries de rails, établies par les réseaux, ainsi que les études qui ont été conduites dans ce domaine, montrent que, pour une population donnée, donc de poids métrique et de nuance donnés, soumis à des conditions d'utilisation données (charge par essieu et trafic total), le pourcentage cumulé F(T) des avaries de rails dues à leur utilisation, en fonction du tonnage total brut supporté T, suit une loi de WEIBULL :

$$F(T) = 1 - e^{\left(-\frac{T}{\eta}\right)^{\beta}}$$

β et η étant deux coefficients de forme et d'échelle. En coordonnées bilogarithmiques (représentation du graphique de WEIBULL), cette loi

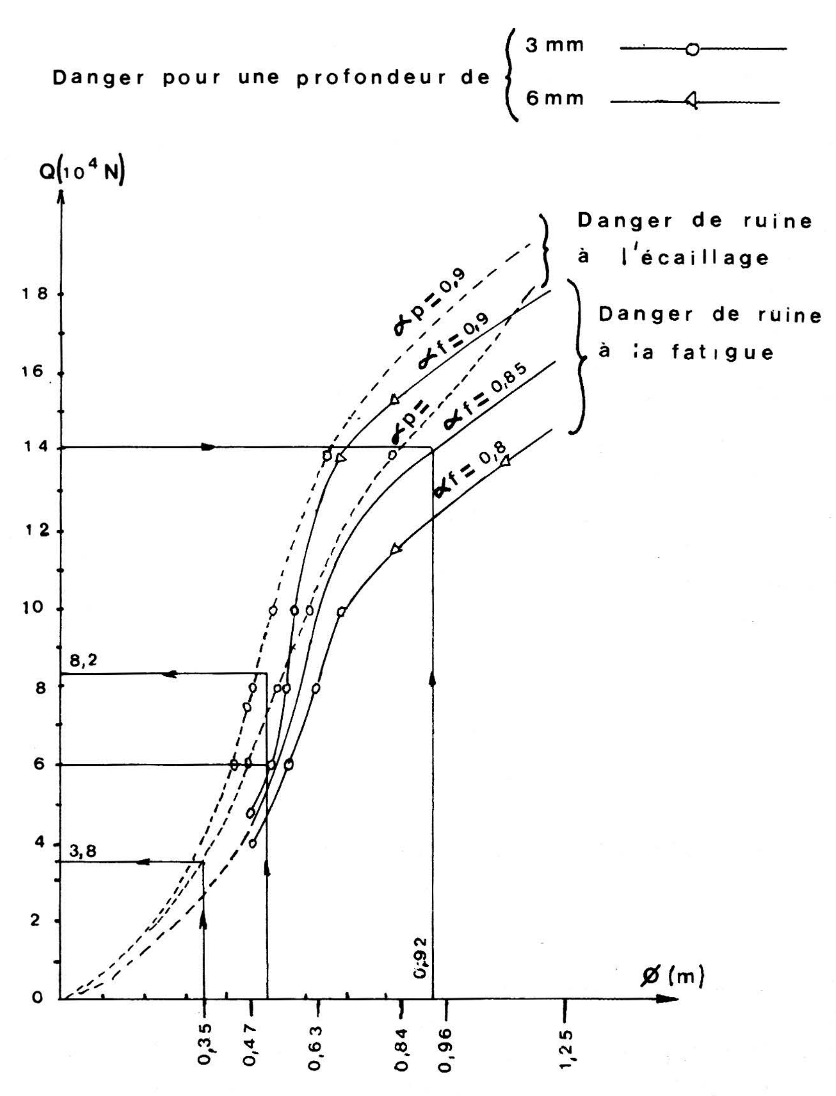


Fig. 42. — *Relation entre charge par essieu et diamètre de roue*

est représentée par une droite (fig. 43). Le paramètre β est lié à la pente de la droite qui est sensiblement constante et comprise entre 2,5 et 3,5 pour les populations de rails actuelles (5).

(5) La loi de WEIBULL tient compte des rails mis en remplacement des rails avariés.

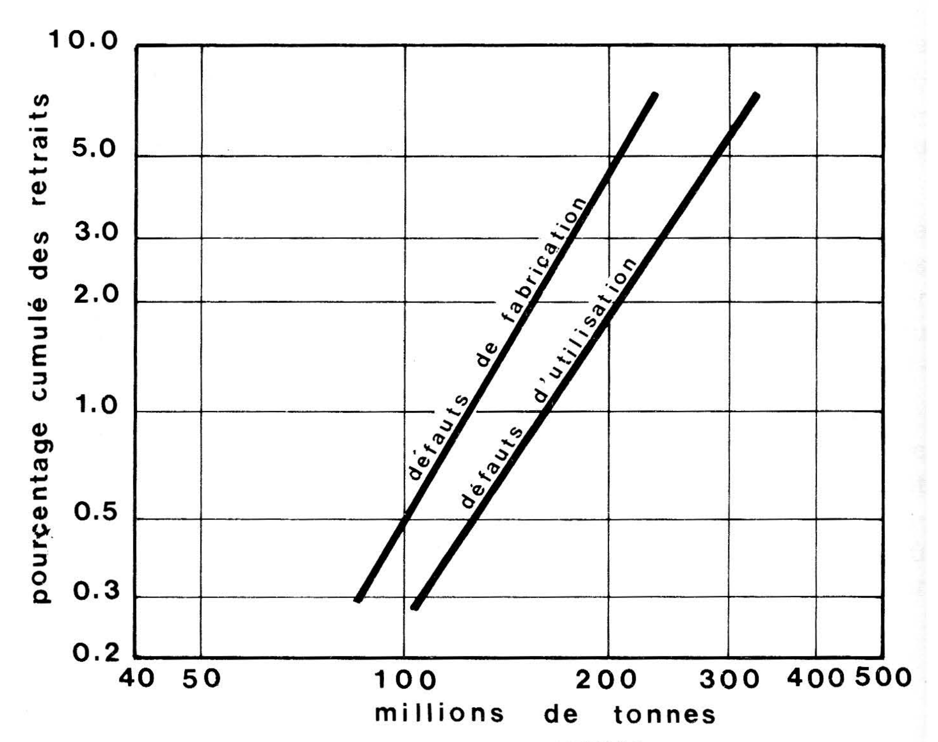


Fig. 43. — *Droite de WEIBULL*

Ces résultats présentent beaucoup d'intérêt : ils permettent tout d'abord, à partir de deux points de la droite (pratiquement à partir d'un pourcentage de 1 %), d'extrapoler l'évolution des avaries et en particulier de déterminer l'époque à partir de laquelle leur nombre, devenu intolérable, rendra nécessaire un renouvellement. D'autre part, ils donnent la possibilité de comparer entre elles des populations de rails et d'analyser l'incidence sur la tenue du rail en voie de la charge par essieu, du poids du rail ou de sa nuance.

D'autres études menées en particulier par la SNCF ainsi que dans le cadre du Comité D141 de l'ORE, ont mis en évidence une loi de fatigue de caractère empirique et expérimental, caractérisée par l'influence sur la fatigue du rail de la charge par essieu et du trafic total :

$$H = k.P^{\alpha} . T^{\beta}$$

Il est possible de raccorder ces deux lois entre elles. Dans la mesure où l'on ne considère que le début de vie d'une population de rails, ce qui signifie que le pourcentage de retraits est encore peu élevé, il est possible d'assimiler F et H, ce qui revient à remplacer F par le premier terme de son développement limité. Or, les valeurs expérimentales trouvées pour les puissances de T sont bien les mêmes dans les deux formules, d'un ordre de grandeur de 3. On peut donc affirmer que les avaries de fatigue du rail dues au contact rail-roue croissent comme la puissance 3 du trafic supporté.

Ce chiffre ne concerne que les défauts de fatigue qui sont en fait ceux qui entraînent le remplacement des rails. Pour les défauts de surface qui n'interviennent pas dans le tracé des droites de WEIBULL, le coefficient varie de 0,5 à 1.

Le coefficient intéressant la charge par essieu reste compris entre 3 et 6, la valeur la plus généralement admise étant de l'ordre de 4. Ce coefficient ne peut qu'être lui aussi une moyenne entre les divers types de défauts.

En fait, la seule considération de la charge par essieu paraît insuffisante, et il serait plus logique de considérer la contrainte de fatigue qui règne dans le champignon du rail. Mais, nous avons vu que la théorie de ZIMMERMANN est impuissante à expliquer les phénomènes de fatigue entraînés par le contact dynamique rail-roue ; il serait sans doute fort intéressant de poursuivre cette étude à l'aide du critère DANG-VAN, c'est-à-dire en prenant en compte les cycles de fatigue qui se développent à l'intérieur du champignon.

Une telle étude permettrait sans doute de justifier le coefficient de forme de 3 de la loi de WEIBULL. Il faut cependant noter que tous les tracés de WEIBULL effectués par différents réseaux correspondent à des lignes où est réalisée une adéquation entre la charge par essieu et l'inertie verticale suivant la formule proposée dans le présent chapitre. Or, d'une analyse effectuée aux USA sur une ligne à très lourdes charges (wagons de 125 tonnes angl. de charge, soit 35 tonnes par essieu) sur des rails de poids insuffisant (115 livres ou 57 kg) semble résulter un coefficient de WEIBULL exceptionnellement compris entre 5 et 6 ; malheureusement, le nombre de points de la courbe est insuffisant pour avoir une confirmation définitive de ces chiffres, d'où l'intérêt de la poursuite de l'étude.

Par contre, les graphiques de la fig. 43 mettent bien en évidence la constance dans des conditions normales du coefficient de forme β dont la valeur reste systématiquement comprise entre 2,6 et 3. Ces

graphiques mettent par ailleurs bien en évidence l'influence défavorable sur la tenue des rails en voie de la charge par essieu. Les autres facteurs déterminants sont l'inertie verticale, à relier comme nous l'avons dit à la charge par essieu, ainsi que la qualité de fabrication de l'acier à rails.

8.2. La durée de vie du rail conditionne évidemment son coût de maintenance ; mais, la notion de durée de vie n'est pas aisée à définir a priori : la loi de WEIBULL nous montre en effet qu'il y a dégradation progressive d'une population de rails donnée. Arrive un moment où le nombre de rails à remplacer annuellement atteint un seuil jugé intolérable en fonction du trafic de la ligne intéressée. La durée de vie est donc une notion d'autant plus subjective qu'une part importante des rails déposés peut être remployée après traitement en usine.

Il peut toutefois être intéressant de procéder à des comparaisons entre des populations de rails possédant des caractéristiques déterminées : charge par essieu, trafic, caractéristiques métallurgiques, inertie verticale, etc. On peut alors définir une ''vie conventionnelle'' en se basant, par exemple, sur le coefficient d'échelle η de la droite de WEIBULL, égal par définition au trafic correspondant à 63 % de retrait de rails pour avaries. Si, d'ailleurs, on veut comparer deux populations de rails différentes, il suffit de faire, pour une ordonnée quelconque de la droite, le rapport des abscisses (rapport des trafics supportés à l'ordonnée correspondante) qui est indépendant de l'ordonnée (le calcul est évident) et, en particulier, égal au rapport pour la valeur 63 %.

En fait, la notion de coût de maintenance d'une population donnée de rails est beaucoup plus importante que celle de durée de vie, qu'elle soit réelle ou conventionnelle. Mais, il existe plusieurs interprétations de cette notion de coût ; on peut en particulier considérer les deux suivantes, dont le calcul est détaillé dans l'annexe 1.

— Le coût d'une opération d'entretien par unité de trafic est inversement proportionnel au trafic que l'on peut écouler entre deux opérations d'entretien provoquées par le dépassement d'un indicateur de dégradation, tel que le nombre de rails avariés.

— Le coût est lié au fait que, essentiellement pour des motifs de régularité de la circulation, on ne veut pas dépasser un certain pourcentage de rails à remplacer pour un trafic déterminé, ce type de coût n'ayant de sens que pour les défauts de fatigue.

Dans le premier cas, le coût est proportionnel à $\frac{\alpha}{\beta}$, dans le second à $\frac{\alpha}{\beta - 1}$. Avec les données précédemment indiquées, on en déduit, dans le premier cas, un coût proportionnel à P pour les défauts de fatigue, et à $P^{1,4}$ dans le second cas qui nous paraît le mieux correspondre à une saine exploitation des réseaux.

Les divers coefficients mentionnés dans le présent paragraphe ont été confortés par une étude de l'ORE. Le tableau 8 donne une vue d'ensemble de la situation :

Type de défaut	**Fatigue**	**Usure**	**Surface**	**Géométrie**
Coefficient α	de 3 à 4	de 3 à 6	3,5	3
Coefficient β	de 3 à 3,5	de 0,5 à 1	1	0,8
Rapport α/β	1	de l'ordre de 4	3,5	3,75
Rapport $\alpha/\beta - 1$	1,4	sans signification		

TABLEAU 8

Si β est inférieur ou égal à 1, le coût diminue avec le trafic dans la deuxième hypothèse, mais reste proportionnel à P^{α}.

8.3. Une étude américaine de 1982 indique que la durée de vie de rails supportant des wagons de 263 000 livres (30 t par essieu) n'est que 62,5 % de celle du rail supportant des wagons de 220 000 livres (25 t par essieu), ce qui correspond, pour le transport d'un tonnage déterminé, à une dégradation variant comme la puissance 2,7 de la charge par essieu. Cette valeur du coefficient α apparaît un peu faible, mais d'autres facteurs ont pu intervenir (précision de l'estimation des tonnages et des charges par essieu, caractéristiques du rail et de l'acier, conditions de pose, etc.).

Quoi qu'il en soit, ces chiffres montrent bien l'influence néfaste de la charge par essieu, et en particulier le coût très élevé qui en résulte pour les défauts de surface et la géométrie de la voie. Si l'on ajoute l'influence de la vitesse et, en particulier, celle de la grande vitesse

qui nécessite une excellente valeur de l'indicateur de qualité de la géométrie de la voie sous peine de surcharges dynamiques aléatoires inacceptables, on voit qu'il est anti-économique de faire circuler simultanément sur la même voie des trains lourds de marchandises et des trains de voyageurs à très grande vitesse, ce qui justifie la politique suivie en la matière par la SNCF et les JNR.

De cette étude sommaire, qui devrait ouvrir la voie à des recherches plus poussées, on peut conclure que de lourdes charges ne se justifient que si :

— l'inertie verticale est bien adaptée à la charge par essieu,
— les économies d'exploitation qui résultent de l'emploi de wagons lourds (transport de pondéreux, p. ex.) compensent largement des dépenses de maintenance de rails sensiblement plus importantes.

9. Usure des rails

9.1. Les retraits de rails de la voie sont essentiellement la conséquence du développement des défauts de fatigue, et les rails modernes, de nuance et section adaptées aux charges par essieu et au diamètre des roues, peuvent atteindre sans inconvénient majeur une durée de vie de l'ordre du milliard de tonnes, dans la mesure où l'usure ondulatoire a été meulée en temps utile.

L'usure, sauf dans le cas de courbes de faible rayon, n'intervient guère dans la détermination de cette durée de vie, puisque les constatations faites, tant en Amérique qu'en Europe, où les conditions d'emploi sont pourtant différentes, conduisent à une usure en alignement droit de l'ordre du millimètre pour 100 millions de tonnes de trafic, usure qui est donc compatible avec l'objectif d'une vie d'un milliard de tonnes.

Cette durée est cependant susceptible d'être beaucoup plus limitée en rampe et en courbe.

En rampe, les patinages, surtout fréquents lors des démarrages, et le sablage, conduisent à une usure prématurée, le plus souvent sur des zones de longueurs limitées.

En courbe, une forte usure par abrasion se produit du fait de l'angle d'attaque des roues, que ce soit des essieux lourds de marchandi-

ses, fortement chargés, ou des bogies d'engins rapides à fort couple de rappel et grand empattement afin de relever la vitesse critique. On combat cette usure par deux moyens : l'utilisation de rails durs en courbe (6) et le graissage.

Si le rail n'est pas lubrifié, l'usure se manifeste sous forme d'arrachement de particules de métal dont les dimensions, généralement de l'ordre de 1/10 mm, peuvent dans certains cas atteindre 2 mm, et elle entraîne l'apparition sur les traverses et le ballast d'une fine poussière de limaille de fer. Lorsqu'il y a graissage, l'usure est beaucoup moindre et les particules d'acier proviennent d'un phénomène de défibrage du congé de roulement très différent de l'effet de "rabotage" en l'absence de lubrification. Ce défibrage résulte d'un phénomène de fatigue par répétition toujours au même point de contrainte de cisaillement. S'il n'y a pratiquement pas d'usure, ce phénomène, connu sous le nom de "shelling", peut aussi provoquer le développement de fissures de fatigue (taches ovales) à partir d'inclusions non métalliques.

Bien entendu, la dureté du rail joue un rôle fondamental dans la résistance à l'usure ; le passage de 265 HB (rail standard) à 315 (rail au Cr) a permis aux Chemins de fer canadiens de diviser l'usure par 2 sous tonnage égal. La fig. 44 illustre le résultat d'expériences allemandes et suisses. On voit donc qu'un surcoût de 10 à 20 % pour acquérir des rails de plus grande résistance présente un intérêt économique considérable si l'on double la vie des rails. Il en est de même pour le graissage. En fonction du rayon des courbes et du tonnage, il est donc possible de jouer sur ces deux facteurs en permettant une légère usure du rail afin d'éviter les phénomènes évoqués ci-dessus.

En outre, les efforts exercés dans la partie la plus sollicitée du champignon conduisent à un écoulement plastique du métal sous les fortes charges de roues ; cet écoulement se traduit par la formation d'une bavure, parfois de chaque côté du champignon, le plus souvent dans les courbes en partie extérieure seulement. Les rails de la file intérieure des courbes en sont très souvent affectés sous les charges verticales et les efforts transversaux, le contact roue-rail se situant vers l'extérieur du champignon. Ce phénomène est aggravé lorsque des convois lourds circulent à une vitesse inférieure à celle pour laquelle le dévers a été calculé, d'où une surcharge du rail bas. Cet écoulement plastique est d'autant plus important que la charge de roue est élevée et la courbure plus accentuée.

---

(6) Les conditions d'emploi sont précisées au chapitre IV.

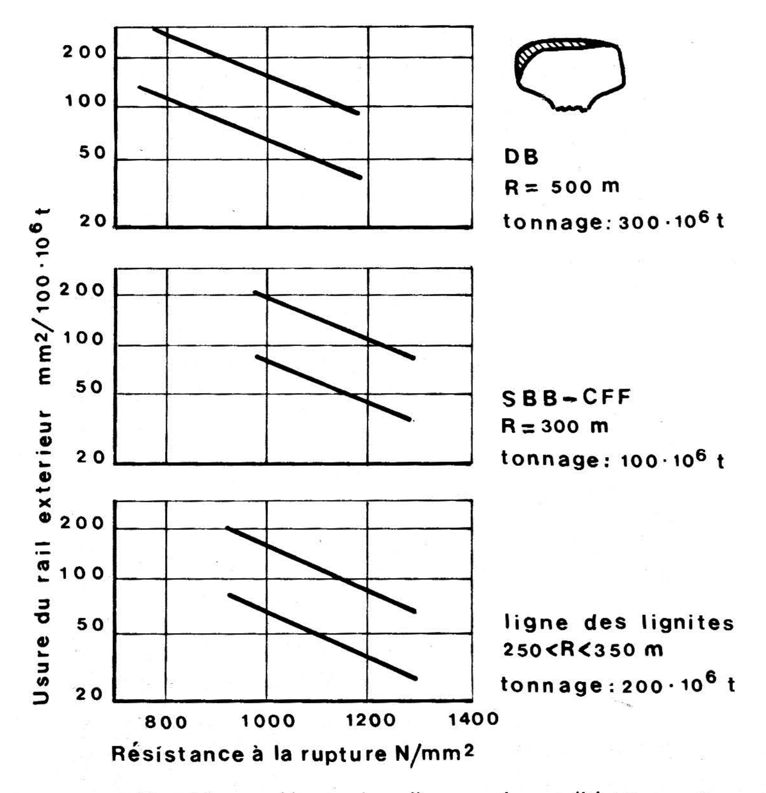


Fig. 44. — *Usure de rails en acier perlitique*

9.2. Le graissage est opéré soit au moyen de graisseurs fixes (fig. 45), soit au moyen de graisseurs de boudins disposés sur les engins moteurs.

9.2.1. Il existe trois types possibles de lubrification du rail :

a) le graisseur fixe installé à l'entrée de certaines courbes. Au franchissement du graisseur, les roues entraînent le lubrifiant sur une certaine longueur. Coûteux d'entretien et de peu de souplesse, ce dispositif n'est généralement utilisé que dans certaines courbes isolées et de très faible rayon, implantées accidentellement sur des lignes en alignement, ou ne comportant que des courbes de grand rayon.

b) Le graisseur de rail : un dispositif monté sur un engin moteur projette de l'huile sur l'arrondi du champignon du rail. La projection est

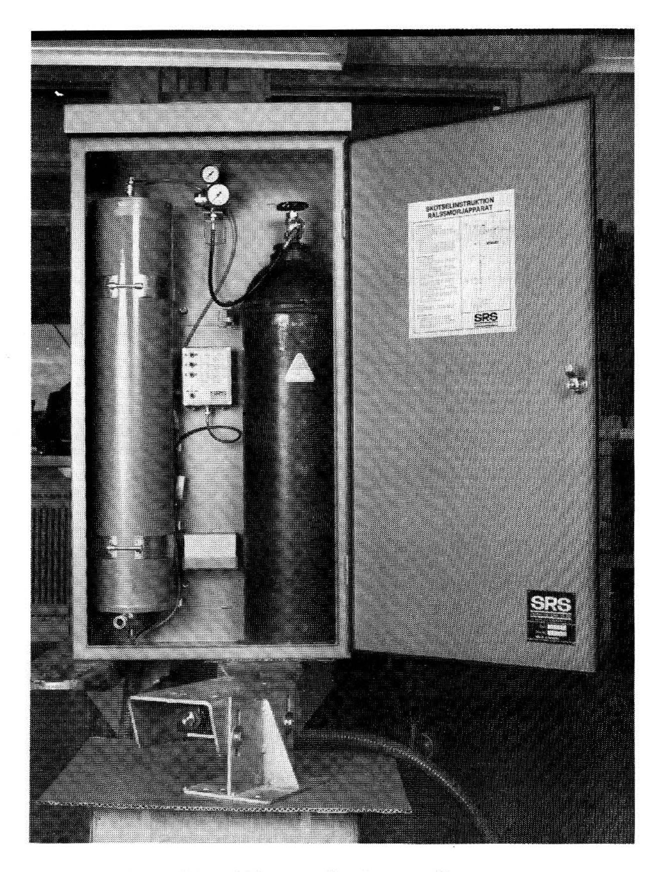


Fig. 45. — *Graisseur fixe*

automatiquement déclenchée par l'angle d'attaque du bogie, c'est-à-dire le rayon de la courbe. Pour tenir compte des mouvements parasites de rotation du bogie, ce déclenchement n'intervient généralement qu'à partir d'un rayon de courbe inférieur ou égal à 1 200 m. Un graisseur protégeant 300 essieux, on peut en général se contenter, en Europe, d'équiper une machine sur 3 ou 4.

Le système est délicat, car l'orientation du jet n'étant pas asservie, on constate souvent une répartition trop inégale de l'huile, d'où risque de patinage.

c) Le graisseur de boudins, qui projette en fonction de l'espace parcouru de l'huile sur le boudin, lequel la dépose à son tour sur le rail,

tant en alignement qu'en courbe. La projection est très régulière et un engin assure le graissage de son propre train. En fait, compte tenu de l'inégalité de longueur des convois, il suffira d'équiper 80 % du parc.

C'est ce dernier système, simple, fiable et robuste, qui est de loin le plus recommandable.

9.2.2. L'AREA a donné les valeurs suivantes du pourcentage approximatif de la durée de vie d'un rail en courbe, par rapport à l'alignement :

Rayon de la courbe	**non graissé**	**graissé**
200 m	15 %	40 %
350 m	40 %	60 %
500 m	55 %	80 %
800 m	75 %	90 %

De même, des mesures effectuées au Canada, sous des charges de 30 t par essieu ont montré que l'usure en courbe était à peu près inversement proportionnelle au rayon de la courbe (de l'ordre de 350 mm^2 par 100 millions de tonnes de trafic en courbe de 900 m de rayon, 550 mm^2 en courbe de 300 m). Mais, l'emploi d'acier à haute résistance peut diviser ces chiffres par 4 ou 5, résultat confirmé par l'expérience française sous des charges plus modestes de 20 à 23 t par essieu : la longévité des rails alliés au chrome-silicium ou des rails traités thermiquement, est 4 fois plus élevée que celle des rails de nuance 70, et 1,5 plus élevée que celle des rails naturellement durs de nuance 90. La fig. 46 donne le résultat d'une étude américaine sur modèle.

Enfin, des essais ont été effectués aux USA par le FAST (7) sur le circuit de PUEBLO, en vue d'analyser l'influence sur l'usure de la nuance du rail et de la lubrification. Dans une courbe de 350 m de rayon, l'usure du rail de qualité standard s'est révélée 4 fois plus rapide que celle des rails au Cr - Si, et 3 fois plus rapide que celle des rails traités thermiquement. Avec lubrification, l'usure des rails standard a été réduite à 1 fois 1/2 celle des rails Si- Cr et 1 fois 1/3 celle des rails TT. Dans le même rayon de courbe, alors que l'usure latérale d'un rail standard était de 17 mm pour 100 millions de tonnes, sans

---

(7) Facility for Accelerated Service Testing.

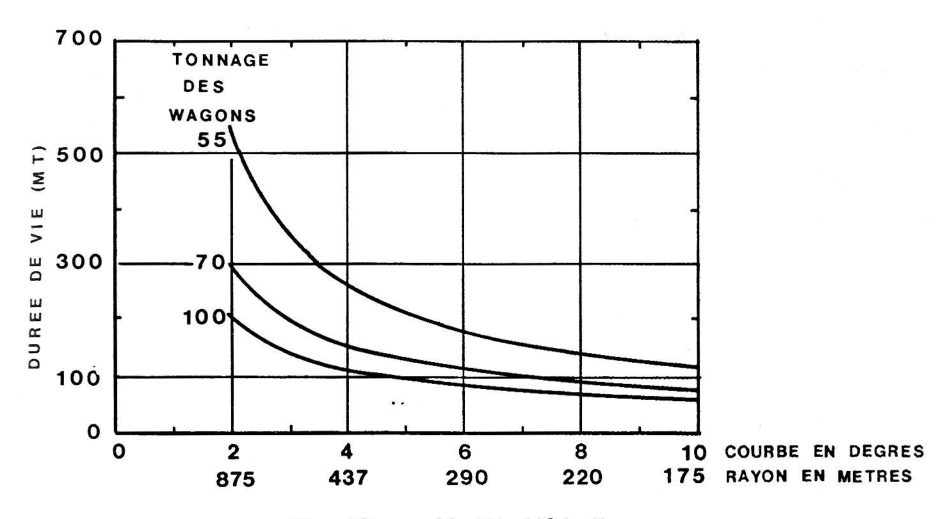


Fig. 46. — *Modèle USA d'usure*

lubrification, le graissage la fait descendre à 2,5 mm. Des gains sur la consommation de carburant de plus de 30 % grâce au graissage ont été enregistrés. Ces chiffres ne sauraient évidemment être pris au pied de la lettre, mais ils permettent d'établir une relativité entre les diverses nuances de rails et de justifier l'intérêt du graissage.

On voit donc bien la triple incidence du rayon de courbe, de la nuance de l'acier à rails et du graissage sur l'usure. Il faut toutefois être conscient que la suppression de l'usure ou tout au moins sa limitation en courbes de faible rayon a pour rançon le développement du shelling que nous évoquerons au chapitre VI. Il n'en reste pas moins que le retrait du rail graissé, même affecté de shelling, intervient bien plus tard que sans graissage. Il est donc économiquement justifié d'utiliser en courbe des rails de nuance dure ou extra dure, et de les protéger par un système efficace de graissage du boudin de roue. De toute façon, il est nécessaire d'intervenir avant que l'usure latérale n'atteigne des proportions excessives diminuant par trop la masse du champignon.

9.3. L'usure latérale du champignon pouvant être à l'origine de montée du boudin sur le rail, il est nécessaire de la mesurer. Les règles

de sécurité peuvent varier suivant les réseaux, par ex. : la SNCF estime nécessaire de remplacer le rail si la tangente au congé est inclinée de 30 degrés par rapport à l'axe vertical du rail, ou lorsque l'usure atteint le bord inférieur du champignon.

Il existe divers dispositifs permettant cette mesure. Les plus simples sont constitués par des calibres manuels ou des gabarits ; c'est la méthode utilisée en usine pour vérifier les tolérances de laminage des rails : ce système ne permet que le contrôle de certaines cotes.

On obtient des renseignements plus complets à l'aide de dispositifs composés d'un palpeur qui suit le profil du champignon et le reproduit sur une feuille de papier à l'aide d'un pantographe.

Il existe enfin des systèmes d'enregistrement électronique. L'appareil de mesure PLT 25 de SPENO (fig. 47) comprend un palpeur qui se déplace mécaniquement en épousant la forme du champignon du rail. Les données sont digitalisées par un enregistreur électronique qui permet la reproduction du profil avec une excellente précision. Cet appareil, déplaçable sur le rail à l'aide d'une canne, peut être couplé avec un système d'enregistrement de l'usure ondulatoire des deux files de rails.

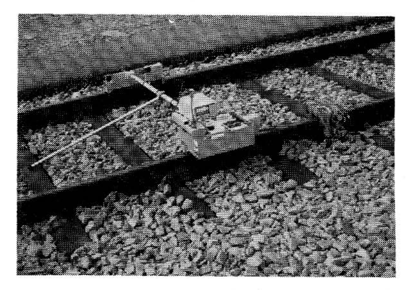


Fig. 47 A. — *Appareil de mesure PLT 25*

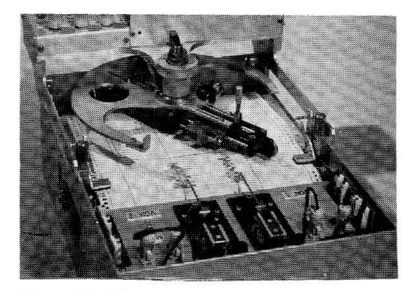


Fig. 47 B. — *Appareil de mesure PT 25*

9.4. Profils d'usure

En alignement, le rail et le bandage tendent chacun vers un profil d'usure qui dépend du profil à l'état neuf de l'un et de l'autre. L'expé-

rience a montré que le profil d'usure du rail dépendait cependant relativement peu du profil d'origine, ce qui a permis de concevoir le profil UIC 60 comme un profil d'usure : une trop grande précision dans ce domaine serait d'ailleurs parfaitement illusoire, compte tenu des tolérances compatibles avec le procédé de fabrication du rail par laminage.

La meilleure solution pour analyser l'évolution d'un profil de rail, ou d'un profil de boudin de roue en fonction de l'usure, est de tracer un graphique des flèches correspondant aux rayons de courbure successifs du profil considéré (la flèche pour une corde de longueur donnée varie en sens inverse du rayon de courbure). Ce graphique (fig. 48) est plus facile à analyser que la représentation directe des profils.

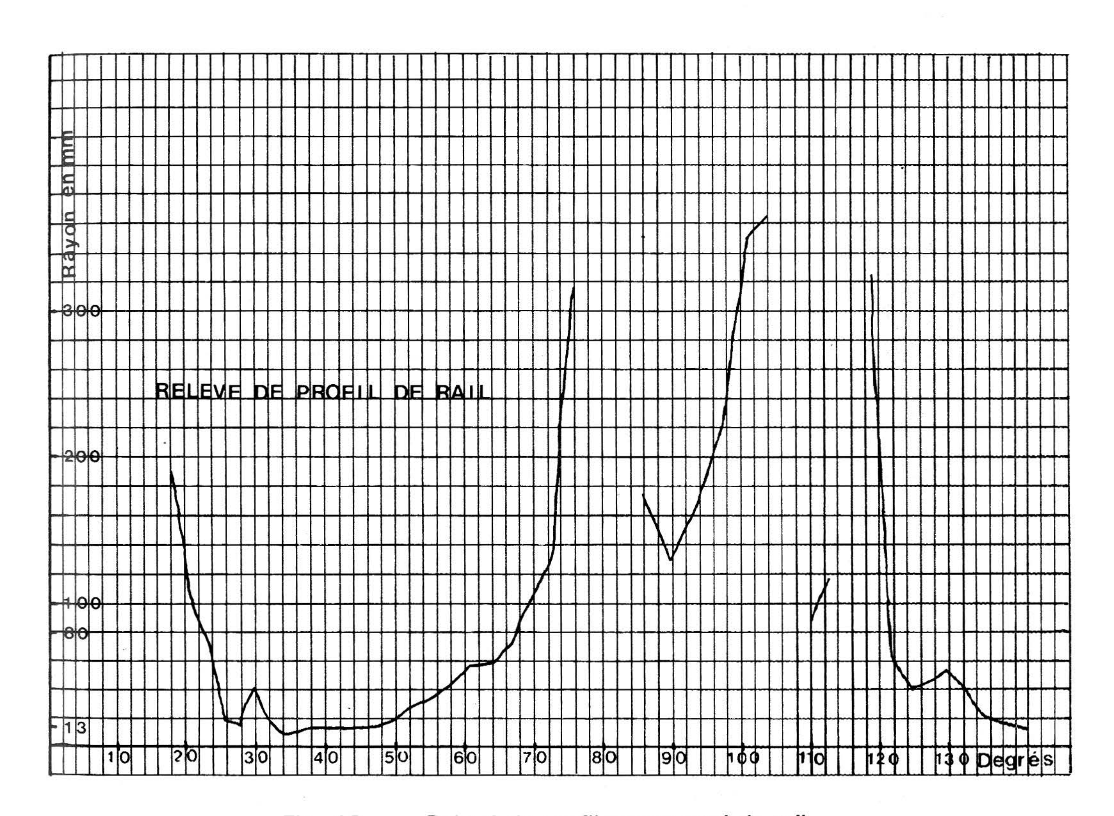


Fig. 48. — *Relevé de profil transversal de rail*

10. Vibrations de la voie au passage des charges roulantes

Le régime de vibrations très complexe auquel est soumise la voie ferrée au passage des charges roulantes se traduit par un ébranlement du sol et un bruit plus ou moins intense.

L'origine de ces vibrations se trouve dans la succession des charges roulantes, les phénomènes de glissement roue-rail et les irrégularités du contact de roulement.

Elles se répartissent essentiellement en trois bandes de fréquences privilégiées :

— de 1 à 15 Hz, de faible propagation, essentiellement dues aux masses suspendues ;
— de 5 à 150 Hz, la seule transmise par le sol, mais qui peut se propager sur une grande distance, et qu'il est très difficile d'étouffer, ce d'autant plus qu'elle se situe vers le bas de la gamme ;
— de 500 à 2 000 Hz, correspondant au bruit du roulement et presque entièrement transmise par la seule voie aérienne, et dans laquelle interviennent les fréquences propres de vibration du rail.

La fréquence de base de vibration propre du rail est supérieure à 1 000 Hz. La vibration du rail peut être excitée par le tassement de l'âme du rail sous l'action des charges, la déformation produite au contact rail-roue, et enfin les phénomènes de glissement et pseudo-glissement qui accompagnent le contact en mouvement de la roue sur le rail.

Sous l'action d'un effort transversal, le champignon du rail se déforme par rapport à l'âme, et l'on peut calculer la fréquence propre de vibration résultant d'une telle action. Le calcul complet a été effectué en France par ROUZIER.

Sous l'action d'un effort transversal Y, l'équation d'équilibre dynamique du rail s'écrit

$$EI_2 \frac{d^4y}{dx^4} + F \frac{d^2y}{dx^2} + \varphi \frac{d^2y}{dt^2} + ky = Y\ (x,\ t)$$

— I_2 étant le moment d'inertie du rail autour d'un axe vertical,
— F la contrainte longitudinale due aux variations de température,
— k le coefficient d'élasticité du rail sous un effort transversal Y exercé au niveau du champignon,
— φ la masse linéique du champignon.

En supposant que la courbe de flexion du champignon du rail en vibration a la même allure que la courbe de flexion statique (les nœuds sont les mêmes), on trouve pour F et Y nuls une fréquence de vibration fondamentale :

$$f_1 = \frac{1}{18\,\pi} \sqrt{85\,\frac{k}{\varphi}}$$

Pour k = $1.4.10^9$ N/m², φ 23 kg/m (rail UIC 60), on trouve f = 1 272 Hz.

Les deux modes suivants sont de 7 000 et 22 390 Hz.

Si l'on fait intervenir un effort thermique dû à un écart de température de 45 degrés, on constate un écart de 9 Hz pour le premier mode, et de 300 Hz pour le second. Ces écarts, surtout pour le mode fondamental, sont sensiblement inférieurs aux incertitudes qui pèsent sur le facteur k.

On peut en conclure que la fréquence d'oscillation du champignon, excitée par le glissement des roues, se trouve dans le domaine audible (bruit du roulement).

Ces résultats ont été confirmés par l'expérience, qui a montré, que le rail soit excité de façon entretenue ou non, un pic dans la bande 1 100-1 500 Hz, et un autre dans la bande 6 400-7 600 Hz.

Ce dernier phénomène résulte de la solidarité des roues d'un essieu et de la liaison des essieux entre eux à l'intérieur des bogies.

Le glissement transversal agit sur le rail d'une façon très comparable au frottement d'un archet sur une corde, d'où mise en vibration transversale du rail. Ce sont des oscillations de relaxation en forme de dents de scie, qui sont peut-être à l'origine de l'usure ondulatoire courte.

A ces phénomènes s'ajoutent ceux qui proviennent de l'usure ondulatoire : l'usure moyenne (0,25 à 0,50 m) à faible vitesse engendre une vibration de 15 à 20 Hz (grondement sourd des métros), bien transmise par le sol ; l'usure courte (0,06 m), à partir de 120 km/h, produit des vibrations à fréquence vocale qui, se situant de 800 à 1 200 Hz, peuvent entrer en résonance avec la période fondamentale de vibration du rail, d'où résulte un bruit parfois insupportable. Mais, hors ce cas particulier, la vibration du rail n'intervient guère dans les contraintes qu'il supporte.

11. Choix d'un profil de rail

11.1. A priori, la vitesse n'a guère à intervenir dans le choix du profil du rail, sous réserve de l'absence d'ondulations susceptibles de provoquer des phénomènes de résonance : la qualité géométrique d'une voie à grande vitesse doit être excellente, avec des tolérances bien plus faibles que sur des lignes classiques, afin de limiter l'importance des efforts dynamiques aléatoires ; les critères d'entretien ne sont pas liés au poids métrique du rail. Certes, des défauts périodiques peuvent entraîner soit des résonances avec certains éléments de la suspension, d'où augmentation anormale des efforts dynamiques, soit la mise en vibration de certains éléments de caisse, désagréable pour le confort des voyageurs. C'est ainsi que l'usure ondulatoire courte, à partir de 200 km/h, entre en résonance avec les fréquences de vibrations propres des rails. Un profil trop léger pourra conduire à une flexion, par exemple, entre traverses excitant à 250 km/h des fréquences propres de l'ordre de 100 Hz. C'est, d'une part, pour réduire les pressions sur le ballast et l'amplitude des vibrations de ce dernier qui croît avec la vitesse et, d'autre part, pour des questions de confort qu'un poids de rail relativement élevé est souhaitable sur des lignes à grande vitesse (60 kg UIC sur le TGV) alors que la relativement faible charge par essieu (17 tonnes) et l'intensité du trafic journalier supporté justifieraient un profil sensiblement moins lourd.

La multiplicité des efforts auxquels le rail est soumis, les imprécisions qui règnent sur le calcul de la plupart d'entre eux, ou leur caractère aléatoire, interdisent tout calcul rationnel des caractéristiques du rail à employer en fonction du trafic à supporter (charge par essieu, trafic global, vitesse). Seules des formules empiriques basées sur une expérience séculaire peuvent apporter une réponse au problème, chaque fois dans des limites bien déterminées.

11.2. La formule la plus simple, proposée au Congrès du Caire de l'AICCF, est la suivante :

$$P = 2{,}5\ Q$$

P étant le poids métrique du rail en kilos, Q la charge par essieu.

D'autres formules, basées sur le trafic et la vitesse, aboutissent à des résultats aberrants dans de nombreux cas, et ceci, répétons-le, car on ne peut pas confondre charges élevées et grandes vitesses. D'autre part, la précision des coefficients de certaines de ces formules est totalement illusoire.

En 1953, la SNCF a adopté la formule DEMAUX destinée avant tout à définir les conditions de circulation d'essieux lourds sur lignes anciennes à armement léger. Cette formule (tableau 9), qui fait intervenir par ailleurs certaines caractéristiques des locomotives à vapeur encore en exploitation à cette époque, est essentiellement basée sur la considération du rapport $\frac{I}{v} \times \frac{1}{\ell}$, $\frac{I}{v}$ étant le module d'inertie vertical du rail, et ℓ l'écartement entre traverses (unité : le mm).

Formule $\frac{I}{v} \times \frac{1}{\ell}$	Poids d'essieu le plus lourd
$100 < \quad \leqslant 140$	17 t
$140 < \quad < 180$	18 t
$180 \leqslant \quad \leqslant 235$	20 t
$235 < \quad \leqslant 350$	21,6 t
$350 <$	23 t

TABLEAU 9

Cette formule semi-empirique est très libérale pour les armements légers, mais il s'agit en fait de lignes à faible trafic, où la moyenne de charge des essieux est très inférieure au maximum, et à vitesses dépassant rarement 30 à 40 km/h.

11.3. En fait, on peut considérer que, par expérience et tâtonnement, on a réussi d'une façon générale une bonne adaptation de la section du rail aux conditions de circulation, y compris les surcharges dynamiques aléatoires dues à la vitesse.

A partir de là, on peut considérer que les contraintes statiques calcu-

lées à partir de l'équation de ZIMMERMANN forment une très bonne base de comparaison. Rappelons que :

$$\sigma = \frac{Qv}{2\sqrt{2}} \left(\frac{E\ell}{I^3\varphi} \right)^{\frac{1}{4}}$$

σ contrainte en kg/mm²
Q charge de roue en kg
E coefficient d'élasticité de l'acier : 22 000 kg/mm²
ℓ écartement entre traverses : 600 mm
I moment d'inertie vertical en mm⁴
v distance de la base du patin à l'axe neutre en mm
φ rigidité du support (coefficient de réaction de traverse)

En prenant φ = 35 kN/mm, qui correspond à une bonne plateforme et σ = 7,5 kg/mm², ce qui réserve le cas des plateformes médiocres, on obtient

$$Q = 2{,}707 \frac{I^{3/4}}{v}$$

Le tableau 10 ci-après donne les résultats correspondants pour un certain nombre de profils.

Origine	**Profil**	**I en cm⁴**	**2 Q** (charge d'essieu)
Profils anciens	30	720	12.54
Profils anciens	34	950	14.14
Profils anciens	36	1 020	16.28
Profils anciens	39	1 140	17.56
SNCF	46	1 588	20.26
SNCF	50	2 023	22.77
UIC	54	2 346	23.95
UIC	60	3 055	27.48
USA	66	3 671	31.44
USA	70	4 029	32.21
UIC	71	4 152	33.72
URSS	75	4 490	33.68

TABLEAU 10

On constate, à partir de ce tableau, que :

- l'inertie augmente beaucoup plus rapidement que le poids au mètre ;
- le profil UIC 71 qui a fait, comme nous l'avons vu, l'objet d'études très poussées, a un excellent rendement ;
- des charges d'essieux de 20, 25, 30 et 35 t, correspondent à des profils respectifs minimals de 50, 60, 70 et 80 kg.
- Par ailleurs, un travelage plus serré n'apporte qu'un gain faible : si l'on passe de 1 666 à 2 000 traverses, I descend de 600 à 500 et on multiplie Q par $\frac{600^{1/4}}{500^{1/4}} = 1.047$.

  Une augmentation du travelage est surtout indiquée dans le cas de plateformes médiocres. Mais, bien entendu, cette mesure ne saurait à elle seule dispenser d'un assainissement d'une mauvaise plateforme et d'un renouvellement de ballast.

  Q croissant linéairement, on représente bien le tableau par la formule :

$$P_{kg} = 2{,}25 \text{ Q tonnes} + 3$$

  Cette formule est très voisine de celle du CAIRE. Elle est valable pour des charges d'essieux comprises entre 15 et 35 t, pour des vitesses de trains de voyageurs à essieux légers n'excédant pas 200 km/h et des vitesses marchandises lourdes de l'ordre de 70 à 80 km/h.

  Pour des vitesses élevées (250 à 300 km/h) où les essieux sont relativement légers (17 t), un profil de 60 kg s'impose pour limiter les flèches du rail entre les traverses et éviter des résonances.

11.4. Mais le choix du profil de rail n'est pas le seul paramètre en cause : il faut également fixer le travelage. Si l'on ne considère que ces deux paramètres, les calculs de ZIMMERMANN donnent la relation qui les lie entre eux. Si l'on se fixe une contrainte maximale dans le rail, la distance entre deux traverses varie en raison inverse du cube du moment d'inertie verticale, c'est-à-dire de la puissance 6 de la section, l'inertie variant à peu près comme le carré de la section.

On peut alors dresser le tableau 11, en partant de la pose type : rail de 60 kg et travelage de 0.60.

Travelage	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70
Section théorique de rail	56.1	57.2	58.2	59.1	60	60.8	61.5
Nombre de traverses par km	2 500	2 222	2 000	1 818	1 666	1 538	1 429

TABLEAU 11

La variation du nombre, donc du coût, des traverses est infiniment plus rapide que celle du rail. Le coût de chacun des deux éléments pour la pose de référence étant du même ordre de grandeur, il n'y a pas intérêt à renforcer le travelage dans l'espoir d'un gain sur le poids du rail. Ce sont donc les problèmes de plateforme et, par conséquent, de coût de maintenance du nivellement, qui permettent de fixer le travelage optimal.

12. Conclusions

En conclusion de ce chapitre, on peut affirmer que l'on dispose maintenant de tout un arsenal de moyens de calcul et de procédés de mesure qui permettent de définir avec une bonne précision le champ de contraintes se développant dans le rail sous l'action de charges connues, ceci tant que le domaine élastique n'est pas dépassé. Lorsque l'on connaît les contraintes résiduelles du rail à leur stade stabilisé, le critère de fatigue de DANG-VAN permet de définir les valeurs d'efforts à ne pas dépasser, ceci pour des cycles de charge pas trop complexes (intensité et direction des efforts). Sinon, le calcul devient excessivement lourd et coûteux puisque le nombre des points de la section du rail à étudier s'accroît considérablement avec la complexité des cycles.

Ces outils modernes, sans prétendre être à eux seuls suffisants, permettent d'étudier de façon plus rationnelle les profils de rails et, compte tenu de l'expérience, les charges qu'il convient de ne pas dépasser.

Nos connaissances restent à améliorer en ce qui concerne les sollicitations et la fatigue du métal dans la zone de contact avec la roue et à son voisinage immédiat sous l'effet d'efforts normaux et tangentiels provoquant des pseudo-glissements, voire des glissements répétés ; les recherches se poursuivent dans ce domaine.

On constate finalement qu'une expérience séculaire, à laquelle se sont ajoutées les connaissances scientifiques relativement récentes que nous venons d'évoquer, a permis une évolution progressive des profils vers des normes donnant largement satisfaction dans les conditions actuelles du trafic. Toutefois, nous l'avons vu, un certain nombre de considérations qui ne sont pas toutes d'essence scientifique, s'imposent dans la conception et le choix d'un profil :

— La largeur et la hauteur du champignon doivent être suffisantes pour que sa masse, par un frettage efficace, puisse résister aux efforts qui se développent dans la zone de plastification au contact de la roue.

  Un champignon suffisamment large donne enfin une marge d'usure suffisante dans les courbes de faible rayon.

  L'expérience a finalement montré qu'une largeur de champignon de 65 à 72 mm donne satisfaction, une largeur plus importante entraînant une répartition peu judicieuse du métal dans le profil du rail, et pouvant conduire à excentrer trop fortement les points d'application de la charge, en accroissant ainsi les efforts de tension dans le profil.

  La hauteur donne toujours une marge d'usure verticale suffisante, car cette dernière est faible (1 mm env. pour 100 000 000 t). La hauteur du champignon normalement adoptée de l'ordre de 50 mm répond à la nécessité d'un équilibrage convenable des masses du champignon et du patin du rail, afin de réduire les déformations dues au refroidissement différentiel, après laminage, source d'une part importante des contraintes résiduelles.

  Dans les souterrains, où l'usure par corrosion peut atteindre des chiffres sensiblement plus élevés, on utilise des profils renforcés (8) dont la hauteur du champignon est supérieure de 10 mm à celle du profil normal et dont l'âme est plus épaisse.

---

(8) La SNCF utilise à cet effet un profil 55 kg/m à âme épaisse.

La forme du dessus du champignon influe sur le niveau des contraintes de contact dynamique rail-roue, mais, par suite de l'usure réciproque du champignon du rail et des roues, on atteint assez rapidement un profil d'usure qui stabilise le rayon de la table de roulement du rail aux environs de 300 mm. Les profils actuels sont en forme d'anse de panier, voisine du profil d'usure.

En outre, compte tenu des profils de bandage neufs adoptés et de leur profil d'usure, les surfaces de contact roue-rail en position centrée de l'essieu doivent permettre une conicité équivalente aussi faible que possible, afin d'améliorer la stabilité de marche transversale des véhicules.

L'inclinaison des joues du champignon doit être telle qu'elle interdise tout contact entre boudin et face intérieure du champignon lorsque l'essieu roule en alignement. Par contre, lorsque le rayon de courbure est assez faible, un contact se produit entre boudin et joues du rail en avant du centre instantané de rotation de la roue. Pour réduire la pression, et par suite l'usure en chanfrein du rail qui en résulte, il est intéressant d'incliner les joues au 1/20. En outre, cette inclinaison a l'avantage d'accroître la largeur des portées d'éclissage, mais il ne serait pas exclu, dans des profils pour longs rails soudés, de donner une inclinaison négative à la partie inférieure des joues du rail, de façon à supprimer les parties du champignon qui ont un faible taux de travail unitaire et ainsi d'augmenter à poids égal le rapport de l'inertie au poids, aussi bien transversalement que verticalement.

Le patin est caractérisé par sa largeur et par l'épaisseur et la forme des ailes. La largeur conditionne, outre la résistance aux moments de renversement, la rigidité transversale du rail qui a une très grande influence sur la stabilité transversale de la voie sous l'action des contraintes thermiques (9), et détermine le taux de compression sur les traverses. Il est toutefois possible de réduire encore ce taux par l'emploi de selles métalliques qui assurent une meilleure répartition de la charge sur la traverse.

L'épaisseur et la forme des ailes du patin sont essentiellement fixées par des considérations d'équilibrage entre les sections du patin et du champignon et par les impératifs du laminage. Enfin,

---

(9) C'est ainsi qu'un rail de profil 60 kg ayant une largeur de patin identique à celle du rail profil 50 kg de la SNCF a dû être rapidement abandonné.

une double pente du patin permet de conjuguer une certaine économie de métal avec une épaisseur suffisante à l'extrémité, pour la fixation.

L'épaisseur de l'âme doit prendre en compte les efforts tranchants qu'elle supporte et les sollicitations élevées qui se développent autour des trous d'éclissage. Ces sollicitations ont été considérablement diminuées dans les rails français par réduction du diamètre des trous à 23 mm et alésage systématique après perçage. L'épaisseur qui doit être également suffisante pour résister à la corrosion varie de 15 à 17 mm pour les profils modernes et est encore plus élevée pour les profils spéciaux posés dans les tunnels.

Les congés de raccordement constituent un point délicat, particulièrement sur les lignes supportant de fortes charges et comportant de faibles rayons. La photoélasticimétrie a permis d'attribuer la cause de très nombreuses fissurations constatées sur les réseaux américains aux concentrations de contraintes favorisées par l'excentricité des fortes charges supportées par le champignon. Pour réduire ces concentrations, les Américains ont été conduits à adopter des rayons de courbure de l'ordre de 19 mm au lieu des 7 et 8 mm utilisés antérieurement, puis un profil (fig. 49) appelé "torsion resisting", adapté à la pose en longs rails

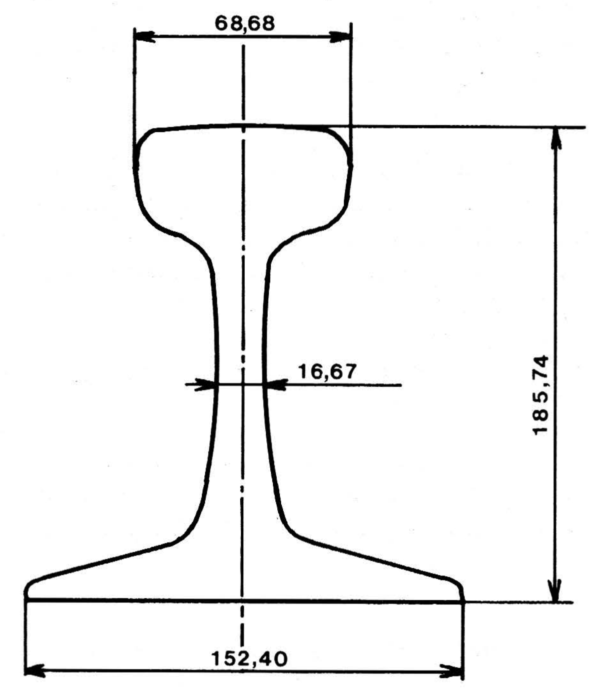


Fig. 49. — *Profil "Torsion resisting"*

soudés. Ce type de rail nécessite un éclissage spécial qui n'est possible qu'avec une hauteur suffisante du rail, donc avec un poids élevé qui ne saurait se justifier économiquement pour de faibles charges par essieu.

L'inclinaison des portées d'éclissage est importante pour la tenue des joints. Si cette inclinaison est forte (1/2), le rachat d'usure de l'éclisse se fait avec un déplacement relativement faible, mais les efforts tendant à l'ouverture de l'éclissage sont importants et les contraintes dans les boulons de fixation d'éclisses élevées. Au contraire, une faible inclinaison (1/4) fatigue moins les boulons, mais limite les possibilités de rattrapage d'usure et complique le problème du raccordement à l'âme. On en est arrivé à une solution de compromis fixant à 1/2,75 l'inclinaison des portées d'éclissage.

Un bon équilibre thermique du profil évite de trop fortes déformations lors du refroidissement après laminage, donc diminue les contraintes résiduelles de dressage.

Le profil doit tenir compte enfin des conditions de laminage. C'est ainsi que le rapport de l'épaisseur à la largeur du patin doit être supérieur à 0,075 et l'épaisseur en bout doit être d'au moins 11 mm.

Un rapport de l'ordre de 1.1 à 1.2 entre la hauteur du rail et la largeur du patin est optimal.

Pour terminer ces considérations générales, nous ne saurions trop insister sur l'aspect économique du problème du rail, compte tenu du coût qu'il représente dans l'exploitation d'un réseau. A cet effet, il convient de s'attacher fermement aux points suivants qui seront développés tout au long du présent ouvrage :

1. Choix d'un rail de qualité : une majoration de prix de 10 à 15 % conduit souvent à doubler la vie du rail, le rapport qualité/prix augmentant très rapidement lorsque la qualité augmente. Le cahier des charges, le choix de l'usine, les conditions de réception et de contrôle, les précautions lors des manutentions et à la pose sont fondamentaux. Outre la durée de vie, les ruptures prématurées et les déraillements en résultant sont à la fois très onéreux et à l'origine de perte de crédibilité commerciale du transporteur.
2. Maintenance préventive rigoureuse : la surveillance, le contrôle destructif, le traitement en temps utile de l'usure ondulatoire, le

traitement des défauts de surface, sont une des bases essentielles de l'entretien de la voie.

3. Retraitement en usine des rails usés, qui permet de valoriser considérablement un produit souvent considéré à tort comme ferraille, la valeur de récupération pouvant alors varier du simple au double.

ANNEXE 1
ESTIMATION DU COÛT DE MAINTENANCE DES RAILS

Première méthode :

La dégradation e(T) des rails s'exprime en fonction de la charge P par essieu, du trafic T supporté et de la vitesse V par une expression de la forme :

$$e(T) = A.P^{\alpha}.T^{\beta}V^{\gamma}$$

Le coût déterminé par unité de trafic d'une opération d'entretien est évidemment inversement proportionnel au trafic qui s'écoule entre deux opérations successives d'entretien lorsque l'indicateur e a atteint le maximum tolérable ; donc :

$$C = k\left(\frac{l}{T}\right) = k . \left[\frac{P^{\alpha/\beta}V^{\gamma/\beta}}{e^{1/\beta}}\right]$$

Si l'on travaille en coûts marginaux à partir d'une situation de référence, on obtient :

$$\frac{dC}{C} = \frac{\alpha}{\beta} . \frac{dP}{P} + \frac{\gamma}{\beta} . \frac{dV}{V} - \frac{l}{\beta} . \frac{de}{e}$$

e caractérisant le standing ou la fiabilité de la ligne considérée, choisie a priori, on aboutit pour e et V constants à :

$$\frac{dC}{C} = \frac{\alpha}{\beta} . \frac{dP}{P} \qquad \text{soit } C \doteq k.P^{\alpha/\beta}$$

Dans ce cas, le coût de maintenance varie donc comme la puissance α/β de la charge par essieu.

Seconde méthode :

Dans cette méthode, avec la même loi de dégradation, qui donne le pourcentage de rails N qu'il a fallu remplacer après un trafic T depuis l'origine de la pose, on se fixe, soit pour des raisons de sécurité, soit pour des raisons de régularité des circulations, un certain pourcentage maximal F de rails à remplacer par unité de trafic ; on supposera la vitesse V constante :

$$N = AP^{\alpha}T^{\beta} \text{ d'où } \frac{dN}{dT} = A.\beta.P^{\alpha}.T^{\beta-1} \leqslant F$$

Il en résulte :

$$T_{max} = \frac{B.F^{\gamma/\beta-1}}{P^{\alpha/\beta-1}}$$

Le coût de maintenance affectée à l'unité de trafic est proportionnel à $\frac{I}{T_{max}}$ et le coût devient :

$$C = k\,\frac{P^{\alpha/\beta-1}}{F^{I/\beta-1}}$$

Dans ce cas, le coût de maintenance est donc proportionnel à la puissance $\alpha/\beta-1$ de la charge par essieu.

Cette seconde méthode paraît la mieux adaptée aux réseaux ayant un trafic important et dense pour les raisons ci-dessus indiquées.

RÉSUMÉ DU CHAPITRE 3

Le rail est le siège de sollicitations très diverses dont les plus importantes sont les charges statiques et dynamiques aléatoires, analysées dans la chapitre précédent, les efforts longitudinaux (freinage), les efforts d'inscription en courbe, les contraintes dues aux variations de température particulièrement dans les LRS et des contraintes résiduelles provenant de la fabrication ; il s'y ajoute dans la zone de contact rail-roue des efforts très complexes où la limite élastique de l'acier est largement dépassée. Beaucoup de ces efforts sont difficiles, sinon impossibles à calculer, mais fort heureusement, ils n'interviennent pas tous simultanément.

Le simple calcul de la résistance des matériaux est compliqué par l'appréciation des charges dynamiques qui peuvent doubler les charges statiques, mais aussi par l'excentrement variable du point de contact et la flexion de l'âme ; l'inscription en courbe de faible rayon introduit par ailleurs des contraintes de torsion.

Les contraintes dues à la température peuvent atteindre 170 tonnes pour l'ensemble des deux rails et leur limitation impose une série de mesures tant à la pose qu'à l'occasion de la maintenance des LRS.

Les contraintes résiduelles proviennent du refroidissement et du dressage des rails en usine ; elles varient sous l'action de l'écrouissage dû au passage des circulations. Il semble que l'introduction du dressage par traction permette d'en réduire considérablement l'importance.

Un calcul classique basé sur l'application des formules de Hertz permet d'évaluer les contraintes au contact de la roue et du rail ; le dépassement de la limite élastique du métal et les phénomènes de fatigue ne permettent pas d'expliquer les fissurations du champignon du rail ; le critère de DANG-VAN qui fait intervenir les cisaillements critiques dans un plan incliné à 30° sur la verticale et la pression hydrostatique est beaucoup plus proche de la réalité et permet d'apprécier assez finement les relations à respecter entre le diamètre des roues et la charge par essieu.

Des diverses méthodes de calcul du profil du rail, aucune n'est entièrement satisfaisante : la méthode des éléments finis se révèle cependant comme la plus précise et elle peut être recoupée par la photoélasticimétrie et l'extensométrie.

L'usure verticale des rails modernes ne dépasse pas un millimètre par 100 millions de tonnes ; par contre les rails posés en courbe de faible rayon, surtout lorsqu'ils supportent de fortes charges par essieu sont soumis à une forte usure latérale qui peut être combattue soit par graissage (graisseurs fixes ou mieux graisseurs de boudins) ou par l'utilisation de rails de nuances dures ou extra-dures dont l'emploi se révèle le plus souvent comme hautement rentable.

Aucune formule définitive permettant de calculer dans chaque cas particulier le profil à adopter n'est entièrement satisfaisante ; l'expérience montre cependant que pour les voies parcourues à vitesse élevée et supportant des charges de l'ordre de 20 à 35 tonnes par essieu, on peut adopter un poids métrique égal à 2.25 Q + 3, Q étant la charge par essieu, en tonnes.

En définitive, le calcul appuyé sur une solide expérience de près d'un siècle oriente le projeteur vers un certain nombre d'impératifs : équilibrage du profil entre champignon et patin pour faciliter le laminage et réduire les contraintes, champignon aussi massif que possible dont le tracé doit autant que faire se peut se rapprocher du profil d'usure réciproque de la roue et du rail, épaisseur d'âme adaptée à la possible corrosion, congés de raccordements âme-patin et surtout âme champignon aussi grands que possible. La retouche à l'aide du calcul d'un profil ayant donné satisfaction en voie apparaît comme la meilleure méthode d'amélioration d'un profil donné, à conditions de trafic comparables.

4 ACIER A RAIL

1. Qualités requises

L'acier à rail exige les qualités fondamentales suivantes :

— résistance à l'abrasion pour éviter une usure trop rapide
— absence de fragilité pour résister aux chocs (joints, méplats, défauts superficiels)
— absence de susceptibilité à l'autotrempe pour tenir compte des phénomènes thermoplastiques du contact roue-rail et de la possibilité de rechargement par soudure à l'arc
— soudabilité en vue de la confection de longs rails soudés et de la réparation en voie
— adaptation à la production nationale (1) en vue d'obtenir un prix de revient acceptable, dans le cadre du volume annuel de consommation.

Ces qualités sont malheureusement contradictoires dans leur ensemble, un acier résistant à l'usure devant par exemple être dur, donc chargé en carbone et par conséquent relativement fragile. Le produit final ne peut donc que résulter de solutions de compromis, qu'une analyse des principales caractéristiques mécaniques et chimiques du fer, des aciers au carbone, puis des aciers alliés, permet de mieux cerner.

---

(1) La production mondiale annuelle est de l'ordre de 10 millions de tonnes.

2. Caractéristiques générales des aciers

2.1. Le fer

Le fer pur existe sous deux variétés allotropiques : α et γ (2) ayant chacune des propriétés et des domaines de stabilité particuliers (fig. 50)

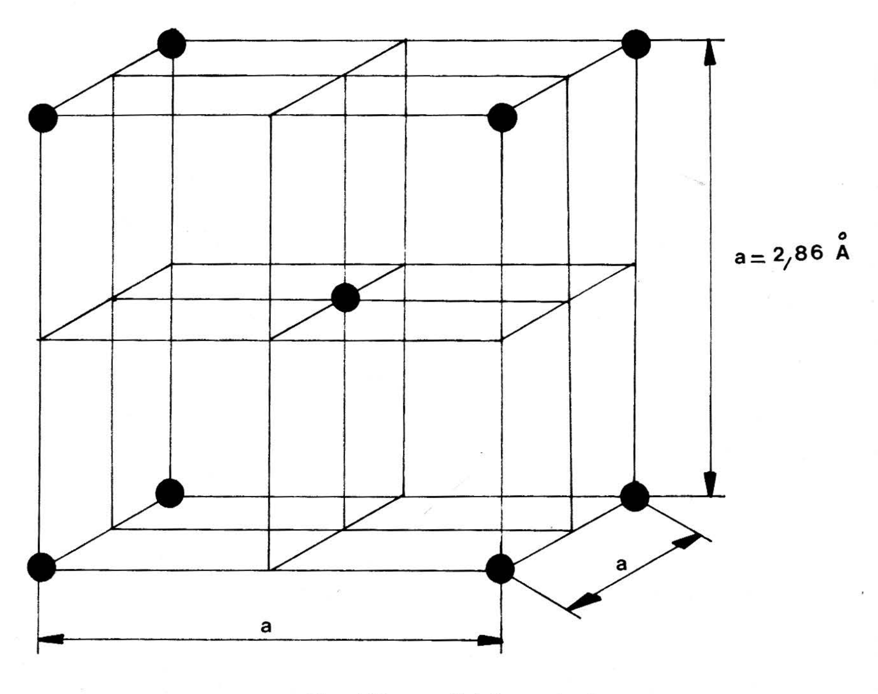
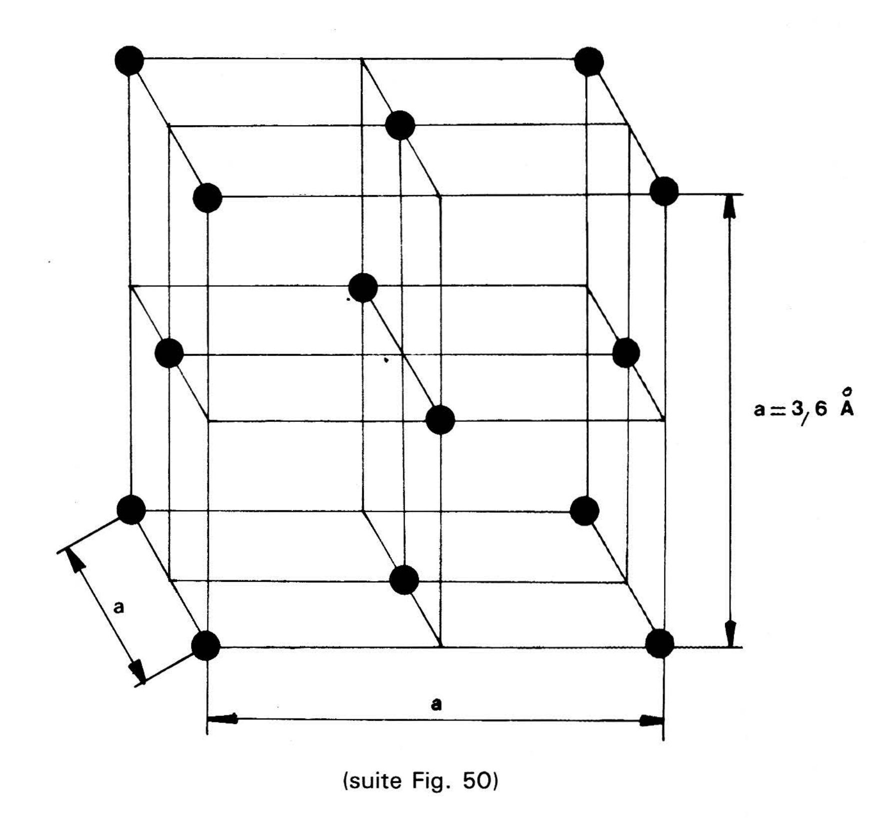


Fig. 50. — *Cristaux de fer*

(2) Il existe à haute température une solution δ d'insertion du carbone dans le fer liquide, de peu d'intérêt dans le cas du rail et dont la maille est de 2.93 Angström à 1 425 degrés.

CRISTAL CUBIQUE A FACES CENTREES (FER γ)



(suite Fig. 50)

— α stable à froid (au-dessous de 912 degrés) cristallisant dans le système cubique centré (atome aux sommets et au centre des cubes), à maille de 2.86 Angström et possédant des propriétés magnétiques au-dessous du point de Curie (750 degrés). On désigne quelquefois sous le nom de fer β la variété amagnétique entre 750 et 900 degrés. Mais, il ne s'agit nullement d'une variété allotropique. Le fer α est plus connu sous le nom de ferrite ;

— γ stable au-dessus de 912 degrés, appartenant au système cubique à faces centrées (atome aux sommets et au centre des faces des cubes), à maille de 3,6 Angström à 950 degrés et qui devient liquide dans les conditions normales à 1 536 degrés.

La disposition des atomes est beaucoup plus compacte dans le fer α que dans le fer γ, le diamètre des vides y étant respectivement de 0,5 et 0,9 Angström ; les atomes de carbone dont le rayon atomique est d'env. 0,8 Angström s'insèrent donc beaucoup plus difficilement à froid qu'à chaud dans le réseau cristallin du fer ; au milieu des arêtes dans le cas du fer α et au centre des cubes de fer γ. A la température ambiante, la solubilité du carbone dans le fer α n'excède pas 0,006 %, alors que le fer γ peut dissoudre jusqu'à 1,9 % de C.

Le carbone peut également s'allier au fer pour former un carbure stable Fe3C connu sous le nom de cémentite et qui titre 6,67 % de C.

En fait, seuls les atomes de rayon inférieur à 0,6 fois le rayon du solvant peuvent s'insérer dans le maillage cristallin de ce dernier : pour le fer, c'est le cas de l'hydrogène (0,46 Angström), de l'azote (0,7 Angström), du carbone (0,77 Angström) et du bore (0,97 Angström). Sinon, un atome du soluté se substituera purement et simplement à un atome du solvant.

2.2. Les alliages Fe-C

Ces alliages se présentent sous diverses variétés allotropiques :

- l'austénite ou solution γ stable entre 723 et 1 500 degrés, de paramètre 3,6 Angström à 950 degrés est une solution solide d'insertion du carbone dans le fer cubique à faces centrées, les atomes de carbone pouvant occuper les centres des cubes et les milieux des arêtes, mais qui ne dissout en fait qu'un maximum de 1,9 % de C. Maintenue à température ambiante par une trempe énergique, l'austénite apparaît en micrographie sous forme de gros grains polyédriques (fig. 51) séparés par des lignes fixes appelées "joints de grains" ;
- la ferrite (fer α) est une solution solide d'insertion du carbone dans le fer cubique centré ; la teneur en carbone en est très faible d'où sa couleur blanche en micrographie sous l'action des réactifs habituels. Sa résistance à la traction est pratiquement celle du fer pur (280 MPa) ;
- la cémentite qui est un carbure de fer Fe3C ;
- la perlite qui, contrairement aux variétés monophasées précédentes est un agrégat de deux phases, la ferrite et la cémentite, dans

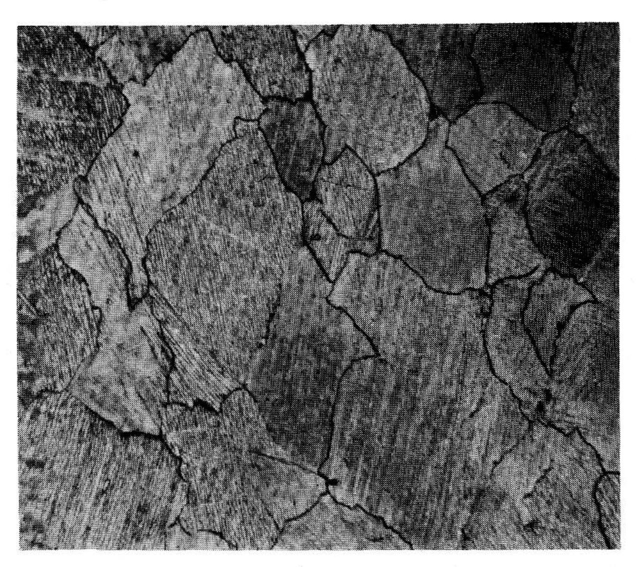


Fig. 51. — *Micrographie d'austénite*

les proportions respectives de 86 et 14 % soit 0,9 % de carbone. C'est une structure eutectoïde dont la finesse, comme nous aurons l'occasion de le voir, joue un rôle important dans les propriétés mécaniques de l'acier (3). Cette structure est d'autant plus fine que la perlite a été formée rapidement. La fig. 52 montre sous le réactif l'alternance des lamelles de ferrite blanche et de cémentite noire.

Il convient d'ajouter à ces diverses formes les structures de trempe (martensite, baïnite, troostite) sur lesquelles nous aurons l'occasion de revenir.

Le plus généralement, l'acier à rail se présente au microscope sous forme de grains de perlite plus ou moins fins reconstituant le grain d'austénite d'origine dans les joints desquels apparaît la ferrite. L'aspect micrographique est d'ailleurs un excellent moyen d'appréciation de la teneur en C d'un acier.

---

(3) La résistance à la traction de la perlite la plus fine obtenue par refroidissement naturel est de 1 000 MPa alors qu'elle ne peut pas dépasser 600 MPa pour une perlite grossière (et même 1 300 MPa par refroidissement accéléré).

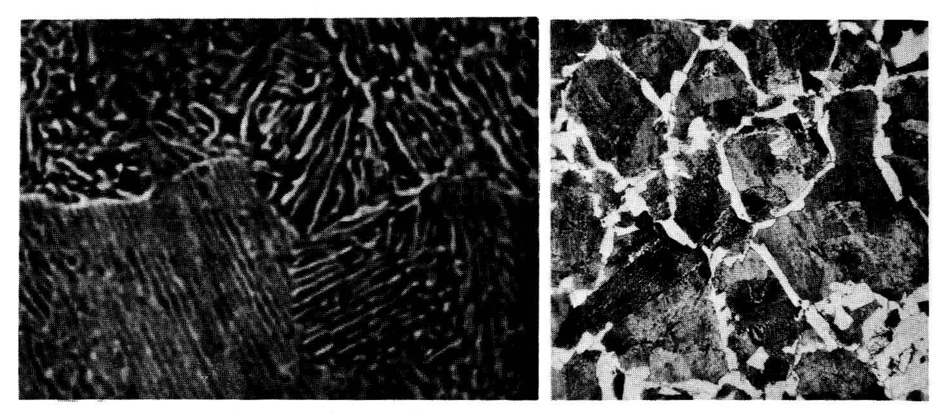


Fig. 52 A. — *Micrographie de perlite lamellaire*

Fig. 52 B. — *Micrographie de ferrite et perlite*

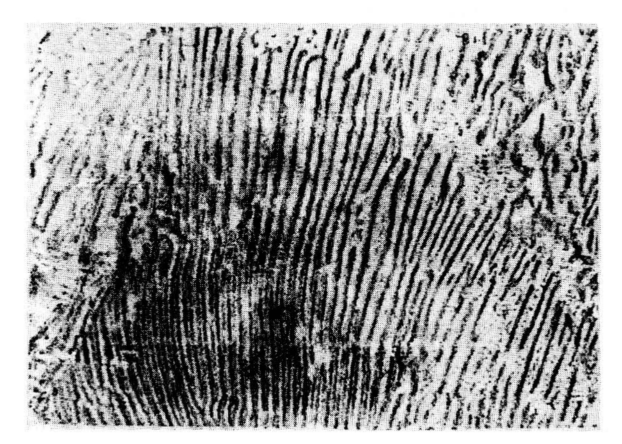


Fig. 52 C. — *Schéma de perlite lamellaire*

2.3. Conditions de formation d'un alliage

2.3.1. Il est bon de rappeler les conditions dans lesquelles s'opèrent le refroidissement et la solidification d'un alliage binaire, qui sont bien représentées par les diagrammes de solidification où figurent trois sortes de courbes :

— le liquidus, le long duquel naissent les premiers cristaux solides au cours de la diminution de la température
— le solidus qui marque l'achèvement de la solidification
— les lignes de transformation sur lesquelles se produisent des changements de variétés allotropiques ou des réactions chimiques.

2.3.2. L'analyse préalable de deux cas simples va nous faciliter l'analyse du diagramme fort complexe Fe-C.

a. Cas de deux corps miscibles en toutes proportions à l'état solide tels que le cuivre et le nickel (fig. 53). La composition de l'alliage est représentée par le rapport IJ/IK, le refroidissement s'opérant à partir du point A (zone de liquide).

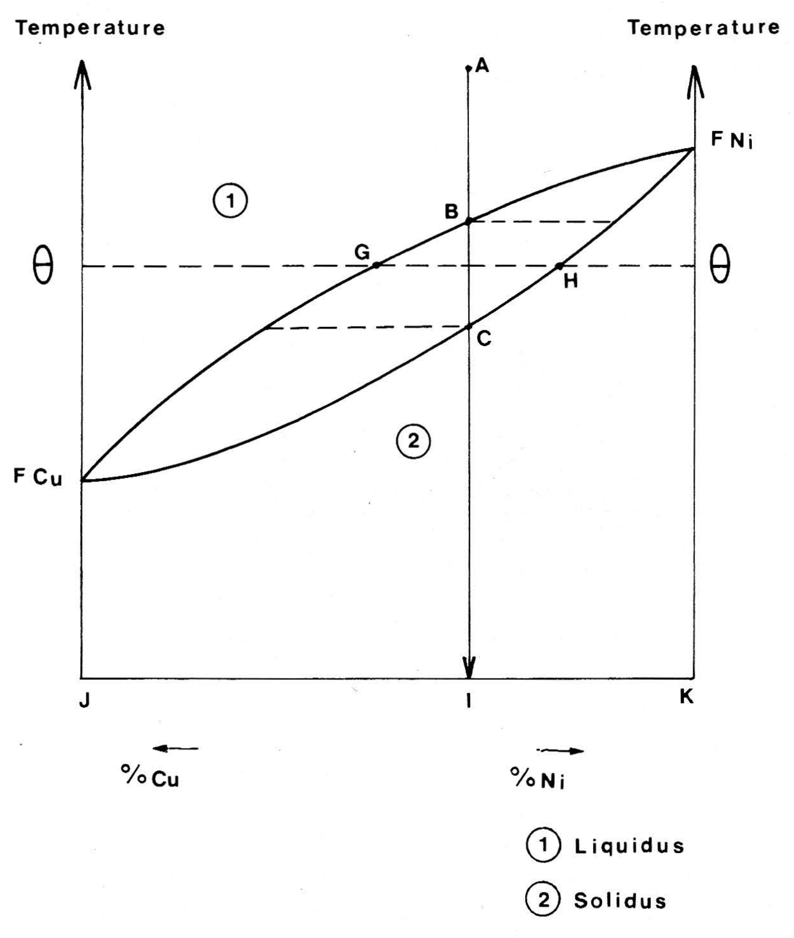


Fig. 53. — *Mélange Cu-Ni*

Lorsque l'on arrive au point B sur le liquidus, commence à se déposer l'alliage solide et ce jusqu'au point C sur le solidus où l'alliage est entièrement constitué par un solide. A chaque horizontale de tem-

pérature, le rapport IG/IH donne les pourcentages respectifs de solide et de liquide. Les lignes du solidus et du liquidus donnent à chaque température la composition des phases solide et liquide.

b. Corps miscibles en toutes proportions à l'état liquide et ne formant ni combinaison, ni solution à l'état solide (fig. 54). Soit A et B les deux corps. Lorsque la température diminue, des cristaux du corps A commencent à se déposer au point C : le liquide s'enrichit en B et s'appauvrit en A, le rapport MQ/MP représentant sur l'horizontale θ la composition du liquide. Lorsque l'on arrive en S, il y a précipitation d'un mélange de composition bien déterminée, dit eutectique des deux corps.

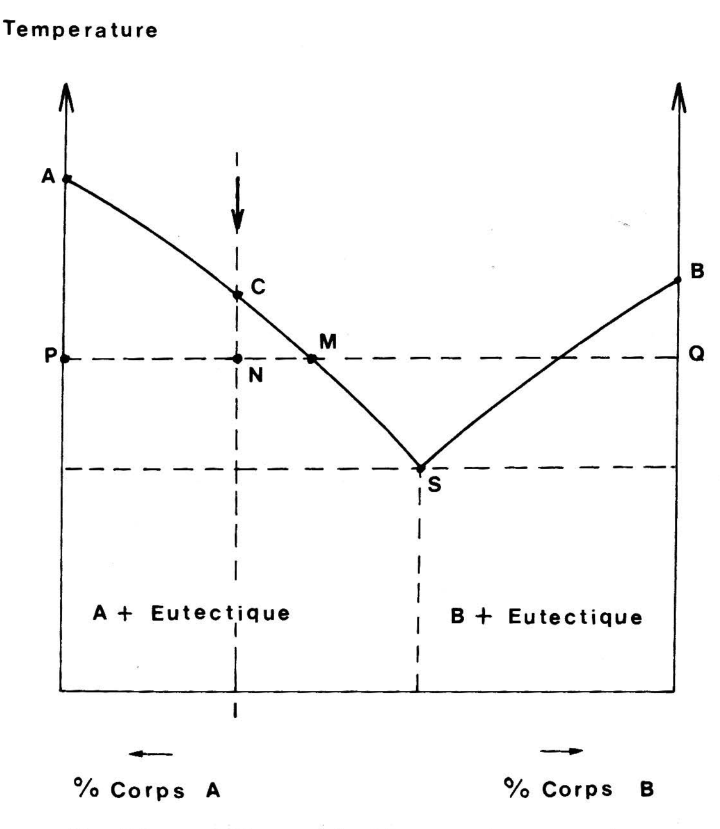


Fig. 54. — *Mélange miscible en toutes proportions*

Cette précipitation est caractérisée par un palier sur la courbe donnant la température en fonction du temps.

2.4. *Le diagramme Fe-C*

L'ensemble de ces considérations s'applique mutatis mutandis au diagramme Fe-C (fig. 55) dont l'analyse permet de mettre en évidence les différentes structures présentées par les aciers en fonction de la température et de la teneur en carbone. Nous nous limiterons toutefois au cas des aciers à rails où la proportion de C est comprise dans la fourchette de 0,5 à 1 % et en excluant tout autre élément d'alliage. Nous allons considérer trois cas :

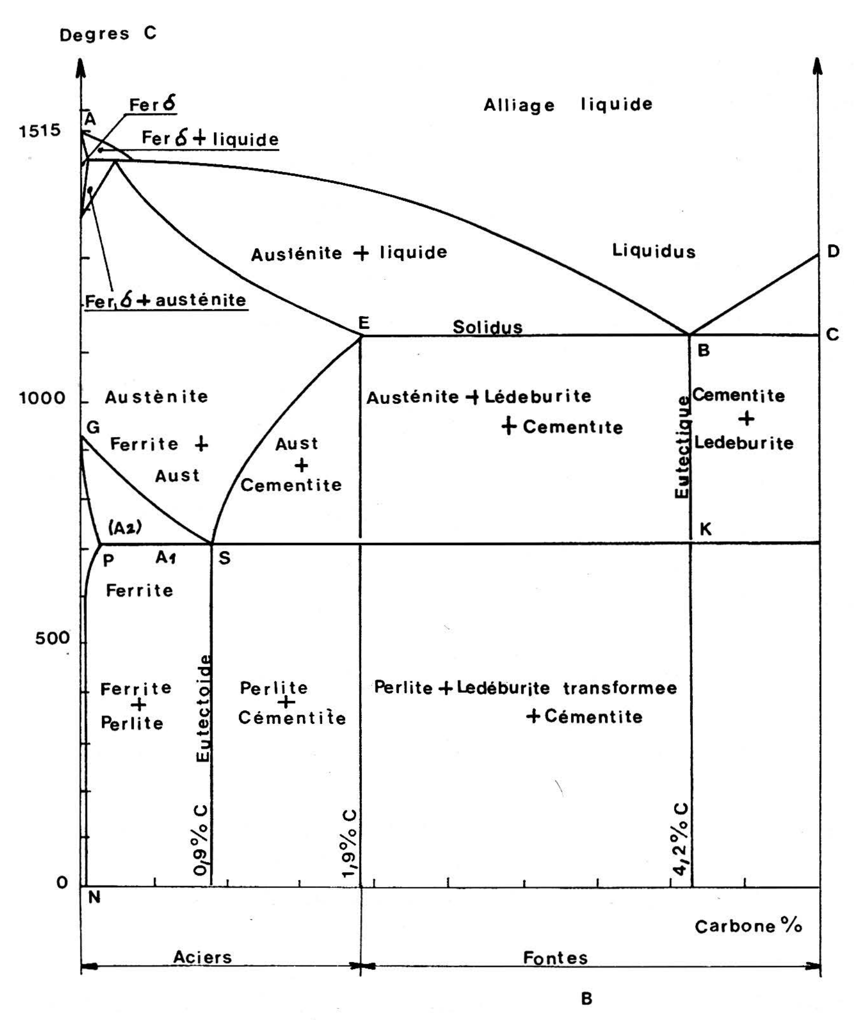


Fig. 55. — *Diagramme Fer-Carbone*

a. Acier dont la teneur en C est inférieure à 0,9 % par exemple 0,8 % ce qui est le cas des aciers à rails de qualité courante. L'austénite solide commence à se déposer lorsque la température s'est abaissée au voisinage de 1 500 degrés. Vers 1 400 degrés, l'alliage complètement solidifié est composé uniquement d'austénite. La température continuant à décroître lentement (de l'ordre d'un degré par minute), lorsque l'on atteint la courbe de transformation A3 (vers 750 degrés pour notre échantillon) la ferrite α stable à basse température apparaît sous forme d'îlots qui précipitent progressivement dans les joints des cristaux d'austénite qui vont alors s'enrichir en carbone, puisque la ferrite, rappelons-le, en dissout très peu et ce jusqu'à saturation. A ce moment, à la température qui, d'après la règle des phases, se maintient constante à 723 degrés, il y a précipitation du mélange eutectique, la perlite formée de fines lamelles de ferrite et de cémentite ; la perlite précipite à l'intérieur des grains d'austénite d'origine dans les joints desquels a précipité la ferrite. A température ambiante, on obtient finalement un mélange ferrite-perlite où la proportion de perlite est d'autant plus élevée que l'alliage d'origine contenait du carbone.

b. Acier à 0,9 % de C, dit eutectique (4). Le processus de solidification est le même, mais il ne se produit aucune transformation jusqu'à 723 degrés (en particulier pas de formation de ferrite). A cette température, l'ensemble de l'austénite se transforme en perlite pure.

c. Acier à pourcentage de carbone supérieur à 0,9, par exemple 1 %, ce qui ne peut être le cas que de rails particulièrement durs. Au fur et à mesure de l'abaissement de la température, l'austénite se transforme progressivement en cémentite, en s'appauvrissant en carbone et la perlite précipite à 723 degrés. A température ambiante, on obtient donc un mélange de perlite et de cémentite.

2.5. Éléments d'addition

Un certain nombre d'éléments d'addition (V, Cr, Mo, Nb) cristallisent dans le système centré et forment des carbures se substituant partiellement à Fe3C dans la cémentite. Le manganèse et le chrome

---

(4) Il existe un autre eutectique, la lédéburite, à 4,2 % de C, sans intérêt dans le cas de l'acier à rails.

donnent des carbures complexes avec Fe3C. Le nickel se substitue partiellement au fer dans la cémentite, bien qu'en fait les éléments cubiques à faces centrées (Ni, Co, Al) ne forment pas de carbures particuliers.

Les carbures autres que la cémentite ne donnent pas d'eutectoïde avec la ferrite à très peu d'exceptions près. La perlite, de son côté, devient un mélange de ferrite et de cémentite complexe, ce qui modifie comme nous le verrons la composition de l'eutectoïde.

Certains éléments, plus solubles en phase γ qu'en phase α accroissent le domaine de stabilité de l'austénite (Mn, Ni) tandis que ce domaine est réduit par les éléments plus solubles en phase α (Cr, Si) : on distingue ainsi les éléments gammagènes et les éléments alphagènes.

2.5.1. La composition chimique et la structure, elle-même très souvent liée à la vitesse de refroidissement, jouent un rôle déterminant dans les propriétés mécaniques de l'acier à rail. Mais, celles-ci sont également fortement influencées par les éléments d'addition qui peuvent modifier la structure de l'acier et déplacer les courbes caractéristiques du diagramme Fe-C.

Il faut déjà noter que l'augmentation du pourcentage de C entraîne une augmentation corrélative de la limite élastique et de la limite de rupture (fig. 56) tout en diminuant l'allongement. Lorsque l'on atteint 1 %, on risque une fragilité excessive et il n'est guère souhaitable de dépasser 0,8 % correspondant aux nuances naturellement dures. Il faut au-delà adopter d'autres solutions.

2.5.2. Le manganèse (Mn) agit dans le même sens que le C pour les propriétés mécaniques, le pourcentage de 2 atteignant la limite de fragilité, plus particulièrement en combinaison avec le silicium. Le manganèse augmente en outre la résistance à l'usure et la ténacité. Il se dissout partiellement dans la ferrite. L'excédent constitue un carbure Mn3C qui s'associe avec Fe3C pour constituer un alliage plus stable que la cémentite pure. Du fait du déplacement des courbes hypoeutectoïdes de transformation, il durcit les aciers perlitiques hypoeutectoïdes en y augmentant pour une teneur en carbone donnée la proportion de perlite et en durcissant la ferrite. Lors de la solidification de l'acier, il se combine à l'oxygène et au soufre, pour former des inclusions d'oxydes et de sulfures de Mn ; sans cet effet, l'acier ne

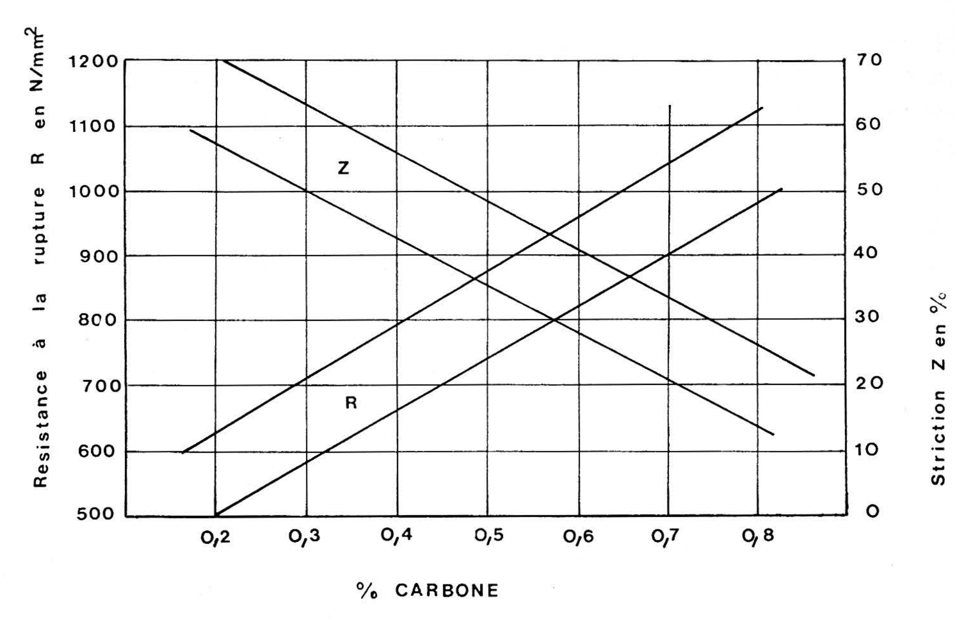


Fig. 56. — *Influence du carbone sur les propriétés de l'acier*

serait pas forgeable, par suite du bas point de fusion des oxysulfures de fer (défaut dit rouverain). Un minimum de 0,6 % de Mn est nécessaire dans les aciers soudables, ce qui est bien le cas du rail. Par contre, un dosage trop élevé (> 1,7 %) peut entraîner une microségrégation martensitique intergranulaire, à l'origine de fragilité, ainsi que l'apparition de structures de trempe si le refroidissement après soudage est trop rapide.

2.5.3. Le silicium agit dans le même sens que le carbone sur les propriétés mécaniques. Il se combine avec le fer sous forme d'un composé Fe-Si qui se dissout dans l'austénite et dans la ferrite. Très avide d'oxygène, il facilite par conséquent, au cours de l'élaboration de l'acier, le dégazage du métal en diminuant la pression partielle du gaz dissous. Mais, à partir de 0,4 %, il entraîne un risque de fragilité de l'acier.

2.5.4. Le chrome augmente la résistance, mais ralentissant la transformation de l'austénite au refroidissement, il entraîne la formation

de martensite, pour des vitesses de refroidissement plus faibles. Le vanadium est un élément favorable à la ténacité. Le vanadium semble agir particulièrement en présence du molybdène. L'action favorable de ces additions réside essentiellement dans une plus grande finesse de la perlite et une précipitation éventuelle de carbures dans la ferrite, qui en augmentent la résistance.

Le molybdène allié à un acier comportant 0,75 % de chrome permet d'obtenir une plus grande finesse de la perlite par abaissement du point de transformation. Toutefois, lorsque l'on dépasse un pourcentage de molybdène de 0,3, on obtient une structure bainitique dont la résistance est moins élevée.

Le niobium (ou colombium) est un élément qui permet, en diminuant la vitesse de recristallisation après déformation plastique à chaud, d'obtenir des aciers à grains très fins et à caractéristiques mécaniques élevées (aciers haute limite élastique pour tôles fortes et poutrelles).

2.6. Impuretés

2.6.1. Si les métaux en tant qu'éléments d'alliage ont dans l'ensemble une influence favorable sur le comportement mécanique des aciers, la plupart des métalloïdes jouent un rôle d'autant plus néfaste que leur élimination est difficile au cours de l'élaboration de l'acier.

2.6.2. Le phosphore qui forme dans la ferrite une solution Fe3P augmente la résistance, mais il est redoutable, car il constitue un grand facteur de fragilité, augmentant très sensiblement la température de résilience.

2.6.3. Le soufre dont la solubilité est négligeable à température ambiante forme à chaud des sulfures FeS et MnS. En l'absence de manganèse, il se forme des oxysulfures relativement fusibles (940 degrés) qui ne permettent plus le travail à chaud du métal qui devient rouverin, c'est-à-dire cassant, fissile et peu soudable, d'où des fissures internes au laminage. Mn améliore la situation, mais de toute façon, la présence de soufre est à éviter dans toute la mesure

du possible, bien que, en faible quantité, elle puisse faciliter l'usinage du rail et contribuer à éviter les flocons d'hydrogène.

2.6.4. Le cuivre est soluble dans l'austénite et la ferrite jusqu'à 0,5 %. Dans la limite de 0,3 % qui n'est pas dépassée dans l'acier à rail, ce n'est pas un élément perturbateur. Certains pensent qu'il est favorable à la limitation de la corrosion atmosphérique.

2.6.5. L'hydrogène est plus soluble dans l'austénite que dans la perlite, d'où sa diffusion à partir du point de transformation et la nécessité d'un refroidissement lent sur lequel nous aurons l'occasion de revenir. Sinon, en cas de refroidissement trop rapide, l'hydrogène qui n'a pas le temps de diffuser complètement forme des flocons sous pression, amorces de fissurations toujours dangereuses du métal.

L'azote augmente la résistance, mais toute présence de gaz dans l'acier doit être évitée.

L'oxygène non éliminé au cours de l'affinage de l'acier se retrouve sous forme d'oxyde de fer. Le calmage en poche ou le dégazage sous vide permettent de l'éliminer. L'acier à rail ne peut être ni effervescent, ni même semi-calmé, du fait des graves risques d'inclusions gazeuses lors du refroidissement. Le choix du calmant (Al ou Si) dépend de la forme et de la finesse des inclusions qui en résultent dans le métal.

2.6.6. L'arsenic contribue à l'augmentation de la résistance à l'usure et de la dureté, mais rend le métal fragile pour des teneurs élevées (0,15 %).

2.7. Nous avons déjà signalé que les propriétés mécaniques des aciers à rails dépendent beaucoup des pourcentages respectifs de ferrite et de perlite dans la structure, de l'épaisseur des grains de ferrite et de la distance interlamellaire dans la perlite ; les propriétés mécaniques sont d'une façon générale d'autant meilleures que la structure est plus fine.

Les éléments d'addition jouent un rôle important dans ce domaine en entraînant un déplacement des diverses courbes du diagramme

Fe-C. Par exemple, l'addition à l'acier au carbone de 1,5 % de Mn ou de 1,6 % de Cr entraîne l'abaissement à 0,70 % de la teneur en carbone de la perlite qui devient un agrégat de ferrite alliée et cémentite complexe ; 2,9 % de Mn ou 4,2 % de Cr ou 1,5 % de V font tomber ce pourcentage à 0,5 %. D'une façon générale, les éléments d'alliage que nous avons mentionnés rendent la ferrite plus dure et la perlite plus fine. La présence de Mn a également pour conséquence d'étendre le domaine austénitique.

2.8. Certains auteurs ont schématisé l'influence d'éléments d'addition par une formule dite de ''carbone équivalent''. Nous en citons une à titre purement indicatif :

$$C_{équ} = C\% + \frac{Mn\%}{4,75} + \frac{Si\%}{10} + \frac{Cr\%}{9} + \frac{Mo\%}{1,5} - \frac{V\%}{10}$$

Une telle formule, à manipuler bien sûr avec beaucoup de précaution, permet d'apprécier a priori l'incidence sur les propriétés de l'acier de l'addition de certains éléments.

3. Les traitements thermiques

3.1. Les transformations précédemment décrites d'un acier en cours de refroidissement se font par diffusion des atomes de carbone au sein du réseau cristallin du fer. Lorsque la vitesse de refroidissement augmente, la durée des phénomènes de diffusion diminue : la structure perlitique s'affine. En effet, les transformations qui se produisent au cours du refroidissement, telles que l'enrichissement de l'austénite en carbone, se font par déplacement des atomes de carbone. Cette migration des atomes de carbone est un processus relativement complexe qui fait intervenir les vides du réseau cristallin nommés lacunes et qui demande un certain temps. Or, plus la vitesse de refroidissement est grande, moins les atomes disposent de temps pour se déplacer : le chemin qu'ils peuvent parcourir est plus court et la structure formée est plus fine.

Il arrivera ainsi un moment où la vitesse de refroidissement sera suffisamment grande — de l'ordre de 100 degrés C par seconde pour

les aciers de 0,5 % de carbone — pour empêcher toute migration du carbone. Il se produit alors un autre type de transformation qui est caractérisée par un réarrangement sur place des atomes de l'austénite. Le réseau cubique à faces centrées de l'austénite se transforme en un réseau pseudo-cubique ou tétragonal, dont le rapport c/a des longueurs d'arête augmente avec la teneur en carbone. Les atomes de carbone s'insèrent entre les atomes de fer sur les arêtes verticales des cubes élémentaires. Comme le nombre d'atomes ainsi insérés est très supérieur à celui correspondant à la limite de solubilité, il en résulte que cette structure n'est pas en état d'équilibre thermodynamique.

C'est le phénomène de "trempe" et la structure correspondante de l'acier est appelée "martensite" (fig. 57). La formation de martensite s'accompagne de variations locales de volume (augmentation de un pour mille) conduisant à l'apparition de contraintes résiduelles qui confèrent à la martensite une grande dureté, mais une grande fragilité et qui peuvent, le cas échéant, provoquer des micro-fissures. Cette augmentation de volume apparaît clairement dans le cas de formation de l'usure ondulatoire courte.

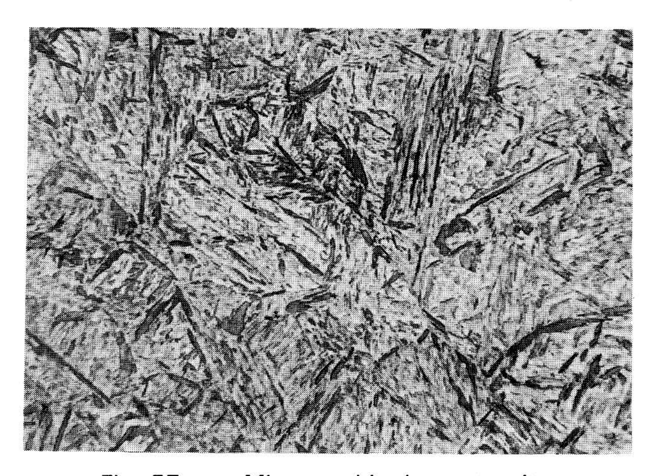


Fig. 57. — *Micrographie de martensite*

Les conditions d'apparition de ce nouveau type de structures sont bien représentées par les courbes TCR (transformation en refroidissement continu) dites aussi "courbes en S" d'après leur aspect

(fig. 58) obtenues en portant le temps en abscisse logarithmique et les températures en ordonnée. Ces courbes dont chacune est adaptée à une nuance d'acier donnée, permettent de déterminer en fonction de la vitesse de refroidissement la structure finale à laquelle on aboutira à température ambiante. Elles indiquent donc soit la vitesse de refroidissement nécessaire pour obtenir une structure déterminée, soit au contraire les précautions à prendre pour éviter une structure fragile, par exemple au cours de soudage où une température élevée est suivie d'un refroidissement brutal.

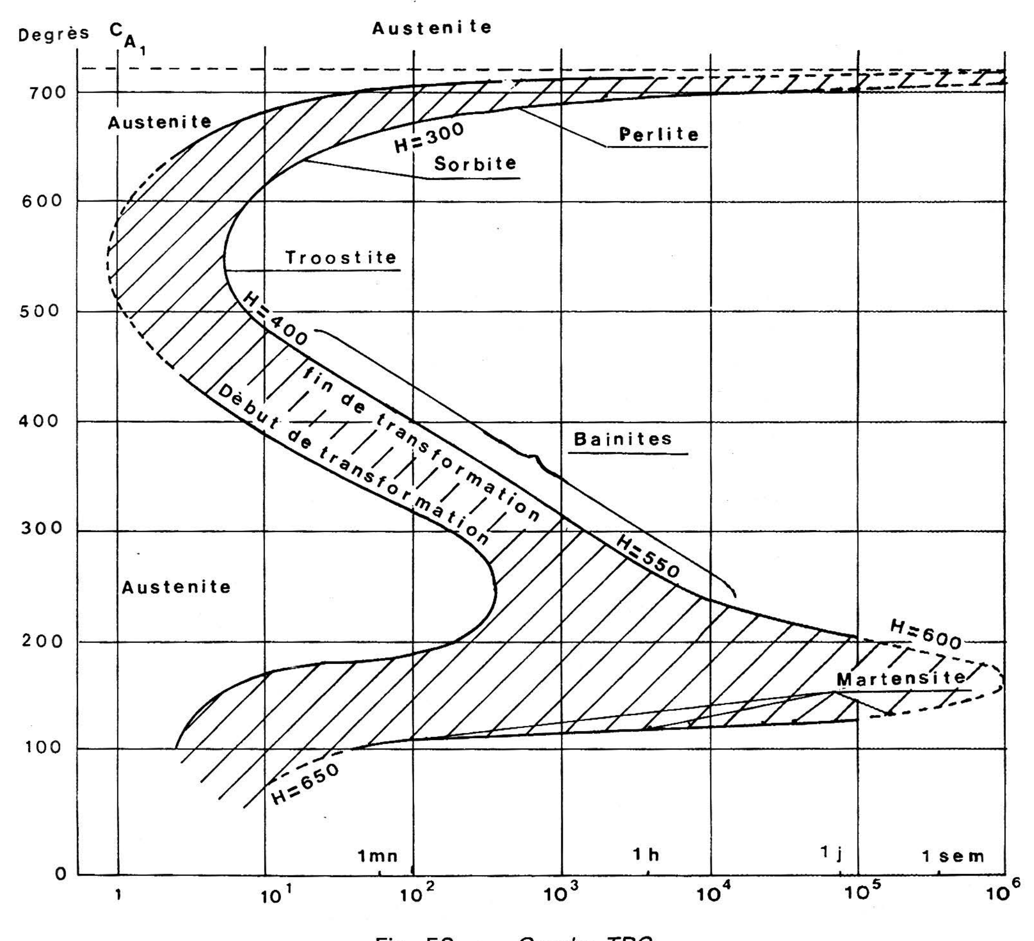


Fig. 58. — *Courbe TRC*

3.2. Les divers agrégats formés au cours de la trempe se distinguent essentiellement par leur structure qui est d'autant plus fine que leur température de formation est plus basse. Ils sont formés de ferrite et de cémentite normale, mais aussi de ferrite sursaturée en carbone et de structure confuse au microscope.

— La sorbite aux propriétés mécaniques variables, mais toujours plus dure que la perlite (R varie de 70 à 140 Hbars).
— La troostite analogue à la sorbite, mais encore plus dense (150 Hbars).
— La bainite qui assure la transition avec la martensite.

3.3. La trempe se fait par immersion dans l'eau, dans l'huile ou par simple refroidissement à l'air au fur et à mesure que la teneur en carbone des aciers augmente. Du fait de leur grande fragilité, les aciers trempés ne sont généralement pas utilisables tels quels. On leur fait alors subir un réchauffage à une température inférieure à celle du palier de 723 degrés C. Cette opération s'appelle ''revenu''.

La transformation martensitique s'accompagne de contraintes résiduelles suffisamment importantes parfois pour provoquer des microfissures que le revenu ne peut éliminer et qui sont susceptibles d'entraîner la rupture de pièces mécaniques. C'est ce qui arrive par exemple au cours d'opérations de soudures mal conduites. Ainsi, déposer sur un rail un cordon de soudure sans aucune précaution risque fort de provoquer à plus ou moins brève échéance une rupture : la vitesse de refroidissement est en effet telle que la formation de martensite à proximité du cordon est immédiate. Il faut donc absolument ralentir le refroidissement, ce qui s'obtient par préchauffage des pièces avant soudage.

3.4. Les aciers alliés sont caractérisés par un déplacement des courbes en S vers la droite (temps croissants) (fig. 59). Les diagrammes de Guillet (fig. 60) permettent de déterminer les structures obtenues en fonction de la composition après refroidissement à l'air calme. Ainsi les structures hors d'équilibre sont plus facilement obtenues qu'avec les aciers au carbone, le nez des courbes n'étant pas touché par des vitesses de refroidissement moyennes. Il en résulte des difficultés particulières pour le soudage de ce type d'aciers. On constate par exemple sur la fig. 59 la nécessité d'un refroidissement très lent et même d'un postchauffage après la soudure pour éviter la formation de structures fragiles.

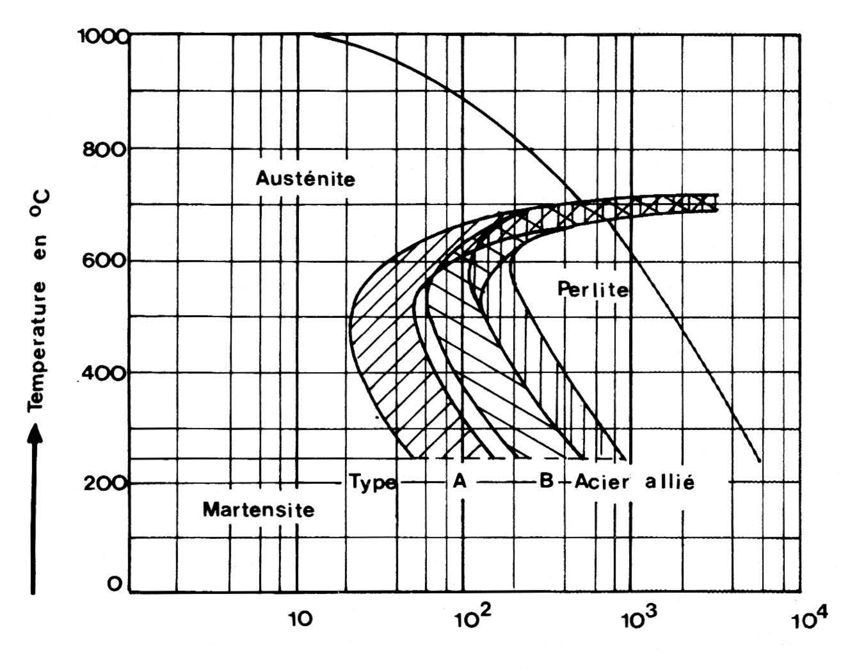


Fig. 59. — *Influence du carbone sur les courbes TRC*

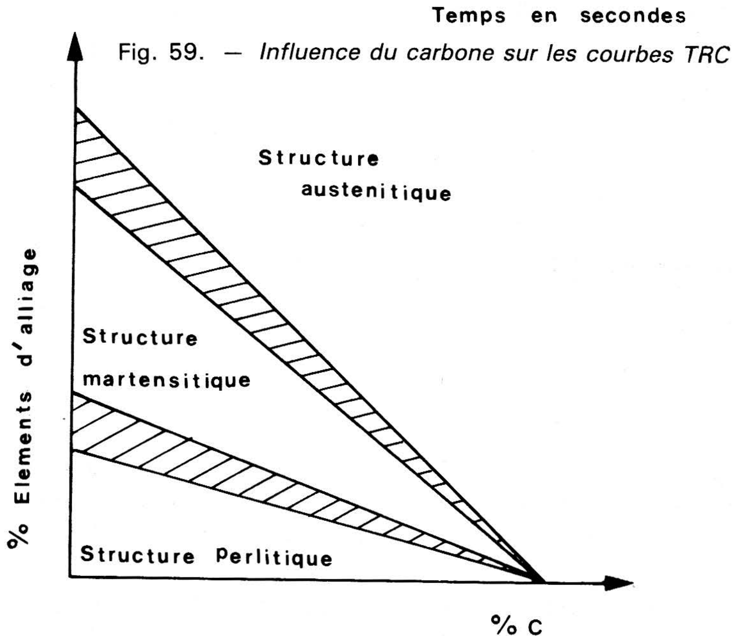


Fig. 60. — *Diagramme de GUILLET*

3.5. Divers traitements thermiques permettent d'éviter certains inconvénients des structures martensitiques et en particulier leur grande fragilité.

— Le revenu consiste en un réchauffage à une température inférieure à 723 degrés, de l'ordre de 400 à 500 degrés. Le revenu supprime les contraintes résiduelles et transforme par exemple la martensite en bainite dont les propriétés en matière de dureté et de fragilité sont intermédiaires entre celles de la martensite et des structures d'équilibre. Mais le revenu ne permet pas d'obtenir la structure lamellaire normale.
— Le recuit, chauffage à température plus élevée qui permet une homogénéisation du grain du métal ou même la reconstitution de la structure ferrite perlite en le faisant suivre d'un refroidissement lent.

Dans le cas de la soudure d'un acier trempant, on voit donc qu'il est nécessaire, soit par limitation de la quantité de chaleur apportée, soit plutôt par préchauffage ou postchauffage, d'éviter un refroidissement trop brutal de la zone affectée par le refroidissement, surtout dans le cas des aciers à fort dosage en carbone ou des aciers alliés.

4. L'acier Hadfield

Les cœurs d'appareils de voie (cœurs de croisement et de traversées) sont des pièces complexes permettant le croisement de deux files de rails et comportant une lacune de plusieurs centimètres réservée au passage de boudins de roue. Le passage des circulations est donc à l'origine de chocs violents. Au début du chemin de fer, les cœurs ont été fabriqués à partir d'éléments de rails usinés et assemblés par boulonnage. Du jeu se développait inévitablement dans de tels assemblages et la médiocre résistance au choc des rails élémentaires ne répondait pas aux exigences d'un chemin de fer moderne. L'essai prometteur de pointes en acier forgé (type Abbaye) a conduit depuis une cinquantaine d'années à la généralisation de cours monoblocs en acier moulé au manganèse, dit acier Hadfield (fig. 61).



Fig. 61. — *Cœur moulé d'appareil de voie en acier HADFIELD*

L'acier Hadfield a une composition très spéciale : de 0,8 à 1,5 % de C, Si $\leqslant$ 0,65 % S < 0,03 % P < 0,04 % et de 12 à 14 % de Mn. Après refroidissement lent, ce type d'acier présente à la température ambiante une structure sans propriétés particulières, composée de ferrite et de carbures mixtes de fer et de manganèse (fig. 51). Mais par immersion brutale dans l'eau froide à partir d'une température de 1 050 degrés, cet acier conserve à température ambiante la structure austénitique à chaud. Cette opération est connue sous le nom d'hypertrempe. La structure obtenue confère aux aciers Hadfield une excellente résistance aux chocs, à l'usure et à la fatigue (résistance à la traction 1 050 MPa) qui est améliorée très rapidement par écrouissage dû aux circulations (5) (transformations partielles en martensite) ce qui explique les essais jusqu'à présent peu concluants de traitement des cœurs neufs par pétardage aux explosifs. En outre, les fissures se développent très lentement.

En contre-partie, toute élévation de la température au-dessus de 250 degrés (6), en particulier au cours de la réparation des fissures par soudure à l'arc qui est un procédé courant de maintenance, tend à décomposer l'austénite en ferrite et carbure. Un refroidissement énergique, par exemple à la neige carbonique, est donc indispensa-

---

(5) A l'usage, la dureté Brinel en surface passe rapidement de 200 à 550.

(6) Les carbures commencent à précipiter à 400 degrés.

ble à l'occasion du dépôt de cordons de soudure qui doit lui-même dépendre d'une technique éprouvée pour limiter au strict minimum l'apport de calories.

L'usage de cet acier se limite aux pièces obtenues par moulage, car très gras il est difficile à laminer. Son coefficient de dilatation thermique est 60 % plus élevé que celui des rails en acier de qualité courante. Enfin, il n'est pas directement soudable avec l'acier à rails ordinaire : plusieurs essais sont actuellement en cours, en particulier la possibilité d'un nouvel acier à bas C (0,1 %) compensé par une addition de molybdène ainsi que des aciers au Cr-V laminés puis usinés.

5. Propriétés mécaniques des aciers à rails

5.1. Les principales qualités mécaniques des aciers à rails qui offrent un intérêt pour la sécurité et la longévité du rail sont : la résistance à la rupture, la dureté, la résilience et la ténacité.

5.2. Résistance à la rupture

5.2.1. L'acier à rail est un acier dur. Ainsi, lorsque l'on trace la courbe donnant l'allongement en fonction de la contrainte de traction, n'observe-t-on pas de coude net de la courbe correspondant à une limite élastique bien déterminée (fig. 62) au-delà de laquelle subsiste un allongement résiduel correspondant à l'écrouissage. C'est pourquoi on définit souvent cette limite de façon théorique comme étant la contrainte qui produit un allongement résiduel de 0,2 %. Cette limite élastique conventionnelle ne présente d'ailleurs pas d'intérêt particulier dans le cas du rail puisqu'elle est largement respectée dans les points les plus chargés du profil à l'exception de la partie supérieure du champignon, régie, comme nous l'avons vu, par le critère de Dang-Van. D'une étude allemande reproduite sur la fig. 63 résulte cependant une assez bonne proportionnalité entre limites d'élasticité et de rupture, le coefficient variant de 0,5 à 0,7 suivant la dureté de l'acier considéré. On a constaté que les limites d'élasticité et de rupture augmentent en raison inverse de l'espace interlamellaire de la perlite, mais la résistance à la rupture augmente moins vite, de sorte que le ratio limite élastique/limite de rupture s'élève dans le cas de rails durs.

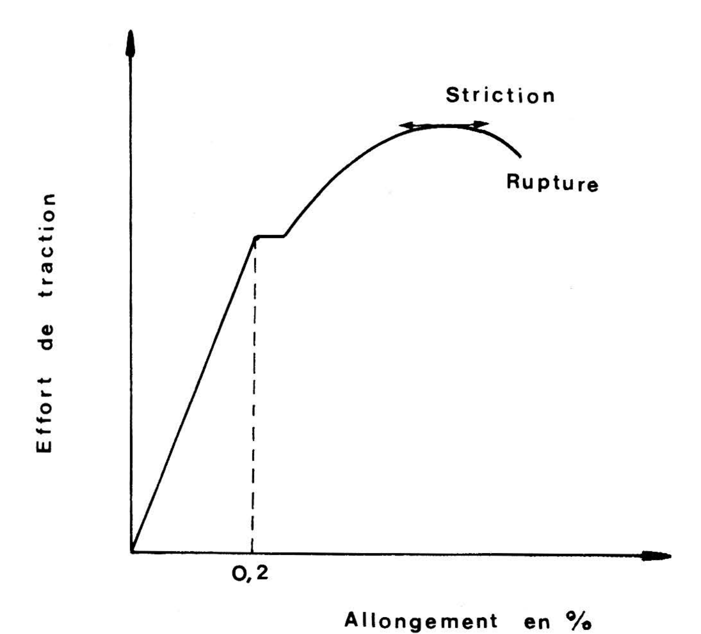


Fig. 62. — *Allongement sous traction*

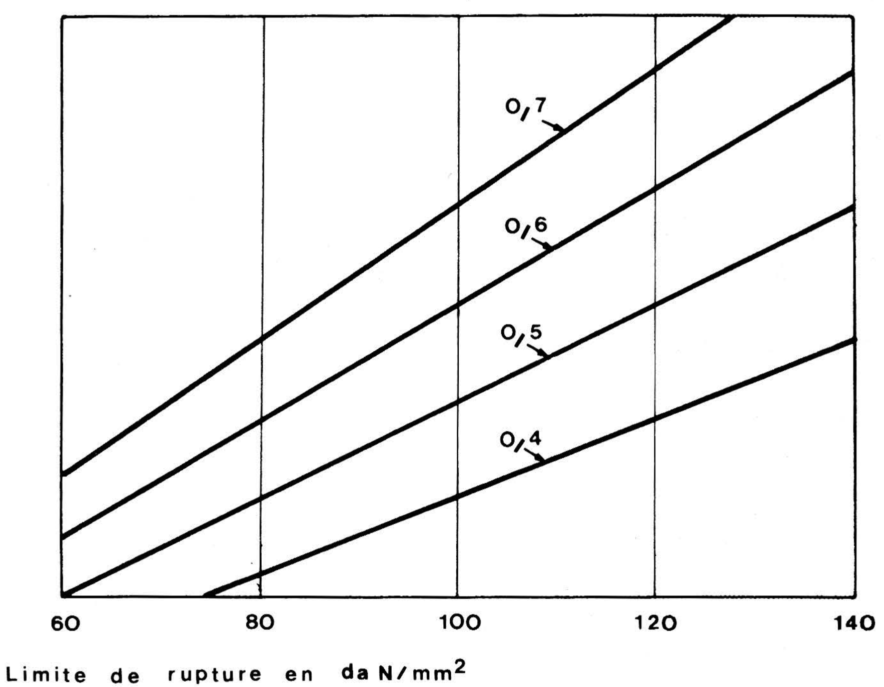


Fig. 63. — *Relation entre les limites d'élasticité et de rupture*

5.2.2. De 700 MPa pour les nuances les plus courantes, la résistance à la rupture peut atteindre 900 à 1 000 MPa pour les nuances naturellement dures (acier au carbone et au manganèse) et 1 100 à 1 300 MPa pour les nuances alliées et pour les rails traités thermiquement.

Cette résistance est fonction de la composition de l'acier et de la finesse de la structure. Il y a de grosses différences entre les résistances à la traction et la dureté des trois constituants de l'acier : 280 MPa et 90 HB pour la ferrite ; 600 à 850 MPa et 225 HB pour la perlite (suivant la finesse) et 2 500 MPa et 700 HB pour la cémentite. C'est donc du pourcentage de ces divers constituants que dépendra la résistance de l'acier. Mais celle-ci est également profondément modifiée par les éléments d'alliages. Les conditions de refroidissement et les alliages sont les paramètres caractéristiques qui jouent sur la finesse de la perlite.

5.2.3. Plusieurs auteurs ont donné des formules permettant de déduire la résistance de la composition. Nous n'en citerons quelques-unes qu'avec toutes les réserves d'usage, puisque le mode d'élaboration de l'acier a lui aussi une influence déterminante sur les propriétés mécaniques.

La formule la plus ancienne est celle d'Osmond :

$R kgs/mm^2 = 22 \text{ à } 26 + 46.5\, C + 21\, Mn + 11\, Si + 65\, P$

(22 : acier doux, 24 : acier dur 26 dur : cas d'acier à rail).

Chacune des lettres représente le pourcentage du composant correspondant. Pour la résistance à la rupture des rails eutectoïdes, une formule américaine donne :

$R = 51 + 44.5C + 8.4Mn + 14.2$

Pour les aciers alliés, on peut citer une formule allemande et une formule américaine

$R = 22.7 + 80.3C + 11.5Mn + 8.7Si + 89.1P + 13.3Cr + 61.4V$

$R = 24 + 81.6C + 11.7Mn + 7.2Si + 57.3P + 7.44Cr \pm 1.9.$

La formule allemande est complétée par trois autres dont l'intérêt principal est également de mettre en évidence l'influence des principaux composants (tableau 12) :

Limite élastique en N/mm^2
101 + 469 C + 36 Si + 85 Mn + 116 Cr + 634 V $\pm$ 21
(P sans incidence)

Allongement en %
30,8 − 22.6 C − 1.7 Si −2.3 Cr + 4,4 V +/− 0,9
(Mn et P sans incidence)

Striction en % :
64.3 − 70.1 C − 7.6 Si + 11.1 Mn − 1.1 Cr + 46,5 V +/− 3.1
(P sans influence)

Dureté Brinell :
113 + 162 C + 34 Mn + 38 Si
(la précision, illusoire, provient de calculs de régression).

TABLEAU 12

Ces formules donnent effectivement, les premières pour les aciers à rails courants et naturellement durs, les secondes pour les aciers alliés, des valeurs satisfaisantes, mais elles ne sauraient expliquer a priori les performances d'un acier de composition déterminée. Elles fournissent néanmoins une indication intéressante sur l'influence des différents composants sur la limite de rupture de l'acier.

Encore faudrait-il tenir compte de la finesse de la perlite pour laquelle nous citerons sans autre commentaire que l'influence néfaste de l'aluminium, la formule américaine suivante donnant la distance interlamellaire en angström :

d en A = 3715 − 1788 C − 630 Mn + 29240 Al,

C, Mn et Al représentant les pourcentages respectifs de carbone, manganèse et aluminium. La figure 64 illustre l'influence de la finesse de la perlite (distance interlamellaire).

On admet en outre que les limites d'élasticité et de ruptures des aciers à structure perlitique varient en raison inverse de la racine carrée de la distance interlamellaire de la perlite, alors que la taille des grains d'austénite d'origine, sans influence majeure sur ces limites, joue sur la rupture fragile. Rheinhausen donne une formule permettant de calculer la limite élastique à 0,2 % (Fig. 65)

$$R_{0,2} = -85.9 + \frac{8,3}{\sqrt{\ell}} \qquad \ell = \text{distance interlamellaire en mm}$$

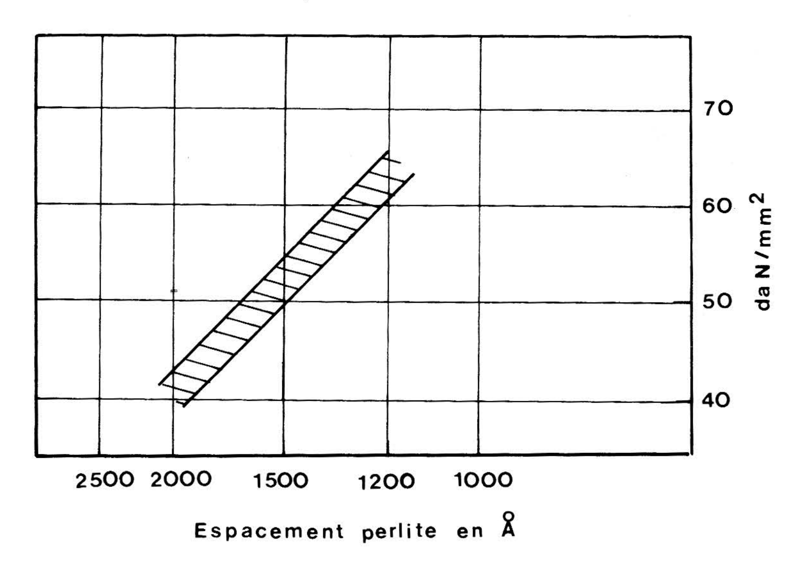


Fig. 64. — *Influence de la finesse de la perlite*

2777 2040 1560 1235 1000 825 Å

90
80
70
60
50
40

Limite elastique en daN/mm²

$R_{p\,0,2}$ [N/mm²] $= -85{,}9 + 8{,}3 \cdot S^{-1/2}$ [$mm^{-1/2}$]

50 60 70 80 90 100 110 120 130

Racine carré de l'espacement interlamellaire en $\sqrt{mm}$

Fig. 65. — *Formule RHEINHAUSEN*

5.3. Allongement et striction

Ces deux propriétés caractérisent la ductilité du métal qui varie en général en raison inverse de la résistance à la traction. La formule empirique suivante donnée par de Leyris permet d'apprécier l'allongement en fonction de la résistance

R + n . A = constante
R : résistance à la traction en kg/mm^2
A : allongement en %.

On peut estimer n à 2.5 et la constante à 115 pour les rails de nuance courante (145 à 150 pour les rails de nuance dure). On en déduit des valeurs d'allongement de l'ordre de 18 % pour les aciers à rail de nuance courante, 10 % pour les aciers naturellement durs.

La striction est le phénomène consistant en un rétrécissement par fluage du diamètre des éprouvettes de traction peu avant la rupture. Elle est caractérisée par le rapport : $\frac{S_0 - S}{S_0} . 100$

S_0 et S représentent respectivement la section d'origine de l'éprouvette et la section de rupture. Lorsque l'on trace la courbe effort-allongement, il y a une baisse de l'effort total au moment de la striction uniquement due à la diminution de section ; néanmoins, la contrainte (effort par unité de surface) continue à croître jusqu'à la rupture. Le type de la cassure est lié à la dureté de l'acier, du fait des différences sensibles existant entre les cercles de Mohr des aciers doux et des aciers durs.

5.4. Dureté

La dureté se mesure par la bille Brinell ou le diamant Vickers (Rockwell pour une analyse très fine qui permet de mesurer sous microscope la dureté des éléments composant l'alliage). On peut lier la résistance à la traction de l'acier à sa dureté par des formules basées sur les théories du professeur Caquot. Pour les aciers à rails, on a approximativement

$$\Delta = 2.86 \, R \quad \text{ou} \quad R = 0.35 \, \Delta$$

R : résistance à la traction en kg/mm^2, Δ : dureté Brinell

(La formule de Pomey $H_v = 1.5\ (E+R)$, E étant la limite d'élasticité, R la limite de rupture en kg/mm² et H_v la dureté Vickers ne donne guère plus de précision).

Cette formule n'est bien sûr valable que pour le rail neuf avant écrouissage : nous avons signalé dans le chapitre III l'évolution due au passage de circulation.

Cette formule conduit à une dureté Brinell de l'ordre de 200 pour un rail normal et 260 pour un rail naturellement dur. L'écrouissage en surface conduit à des duretés de l'ordre de 300 après passage d'un certain nombre de circulations.

Enfin, signalons la possibilité de relier les duretés Vickers (V) et Brinell (B) par la formule empirique suivante (à manier avec beaucoup de précaution) :

$$V = 1.1\ B - 10$$

La figure 66 donne une idée de la dureté comparée de divers types de rails durs. Il convient de noter le risque de baisse de dureté que peuvent présenter certains rails traités thermiquement dans le cas où la vitesse de trempe n'aurait pas été suffisante pour toucher la totalité du profil ; une usure importante d'un tel type de rails peut conduire à atteindre des couches peu affectées par la trempe. Le processus utilisé pour l'élaboration de ce type de rails doit donc tenir compte de cette difficulté.

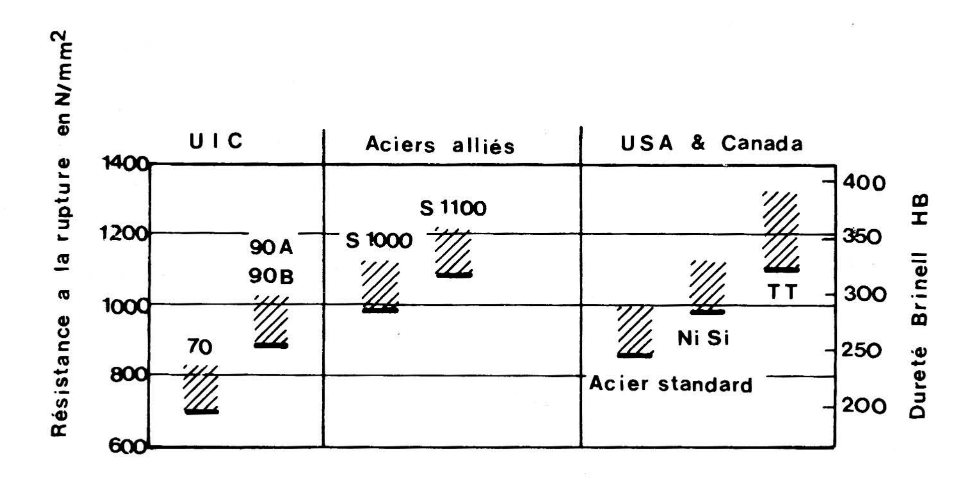


Fig. 66. — *Dureté des rails*

Par ailleurs, la dureté est un élément important de résistance à l'usure, mais il est loin d'être le seul et certaines expériences ont montré, à égalité de dureté, une bien meilleure résistance à l'usure d'aciers à structure perlitique fine que d'aciers à structure martensitique ou d'acier allié : le phénomène de résistance à l'usure est en fait mal connu et mériterait des recherches approfondies. Mais c'est surtout la possibilité d'obtenir des duretés très élevées qui justifie l'emploi de rails alliés ou traités thermiquement, surtout dans la mesure où leur microstructure est suffisamment fine.

5.5. Résilience

La résilience d'un matériau caractérise sa capacité de résistance aux chocs. Elle se mesure pour les aciers à l'aide du mouton Charpy (fig. 67) dont le principe consiste à faire tomber sur une éprouvette entaillée une masse pivotant autour d'un axe, à partir d'une hauteur déterminée. La différence entre la hauteur de chute et la hauteur de rebondissement de la masse (7) permet de mesurer l'énergie absorbée par le choc (en kgm par cm² de section de l'éprouvette). Les aciers durs cassent suivant une rupture fragile : les aciers doux se déchirent et se plient. Cette énergie de rupture est fortement diminuée par entaillage en U et surtout en V de l'éprouvette, ce qui met en évidence l'influence fâcheuse des blessures en particulier au patin de rail.

La résilience augmente considérablement à partir d'une certaine température dite température de transition, variable suivant la qualité de l'acier. Les aciers fragiles à température ambiante et surtout en période froide, ont une température de transition élevée. C'était le cas de rails d'anciennes fabrications : on cite le cas d'un wagon affecté d'un méplat et ayant provoqué par son seul passage plusieurs centaines de ruptures de rails sur une ligne importante. Les rails actuels ont une résilience suffisante pour que pareille mésaventure soit dorénavant à exclure.

---

(7) On fait la différence entre la remontée à vide et la remontée après choc, pour tenir compte des frottements.

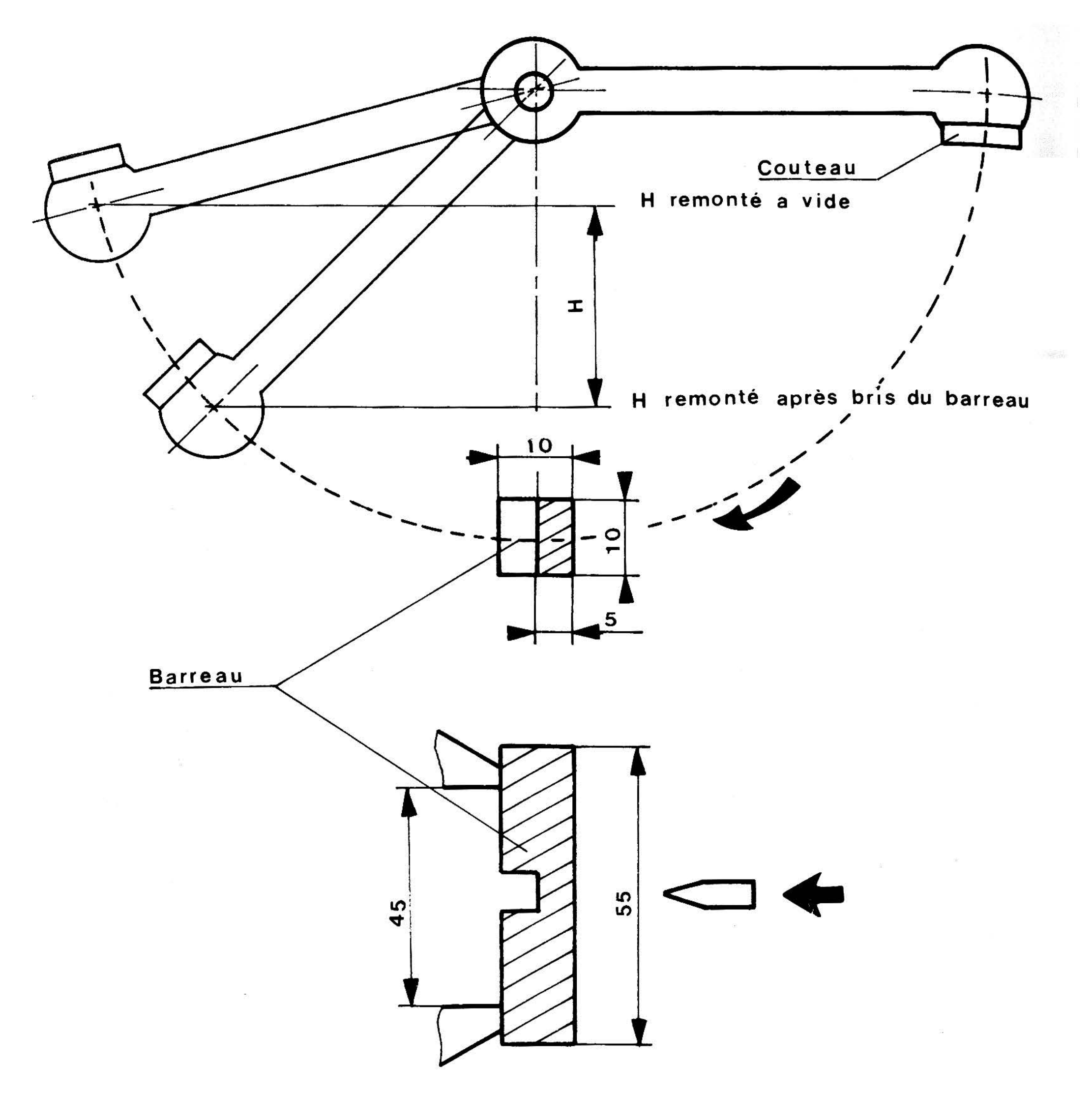


Fig. 67 A. — *Principe du mouton CHARPY*

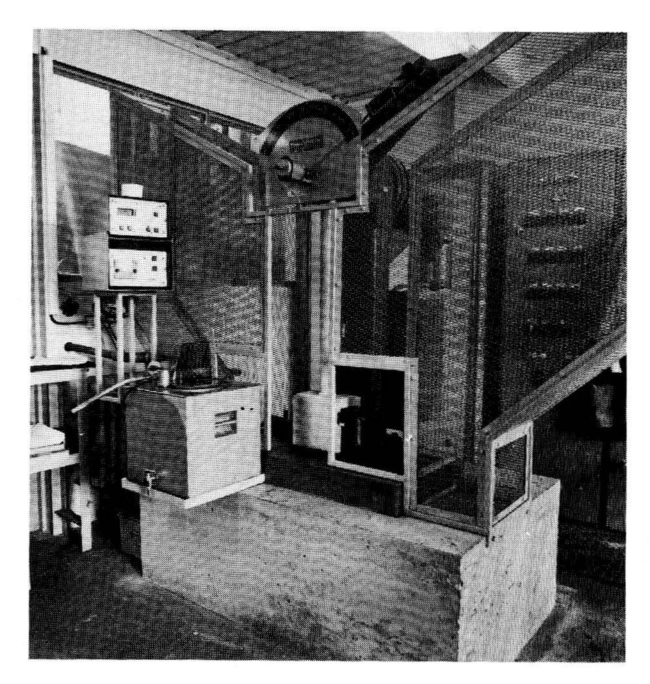


Fig. 67 B. — *Mouton CHARPY*

Par ailleurs, les figures 68 et 69 mettent en évidence l'action favorable sur la résilience d'une épaisseur aussi faible que possible des lamelles de cémentite et d'une diminution de la taille du grain. De même, les éléments d'alliage tels que le manganèse et le chrome ont une action favorable sur les propriétés mécaniques par diminution de la distance interlamellaire.

La figure 70 représente un graphique réalisé en Allemagne des courbes de transition des principales nuances d'aciers à rails et la figure 71 l'influence sur la température de transition de certains éléments d'alliage, d'après une étude japonaise.

5.6. Ténacité

5.6.1. La ténacité caractérise l'aptitude du métal à résister à la propagation des fissures. Si l'obtention des qualités précédentes con-

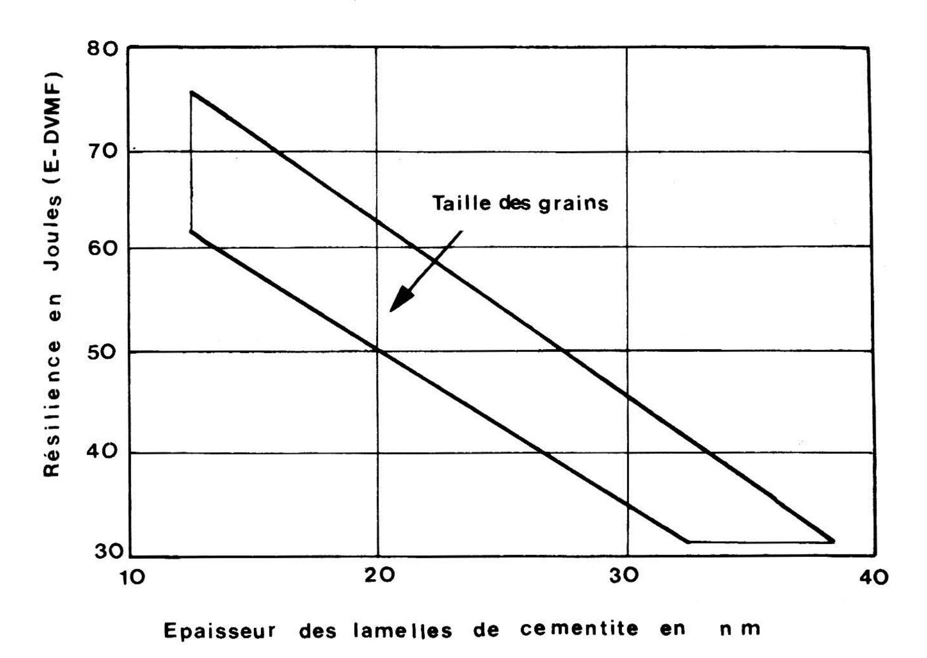


Fig. 68. — *Influence de la cémentite sur la résilience*

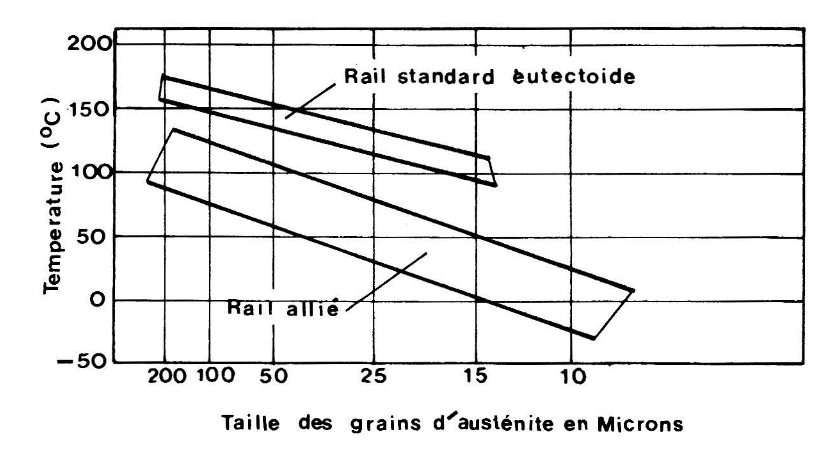


Fig. 69. — *Influence de la taille des grains d'austénite sur la résilience*

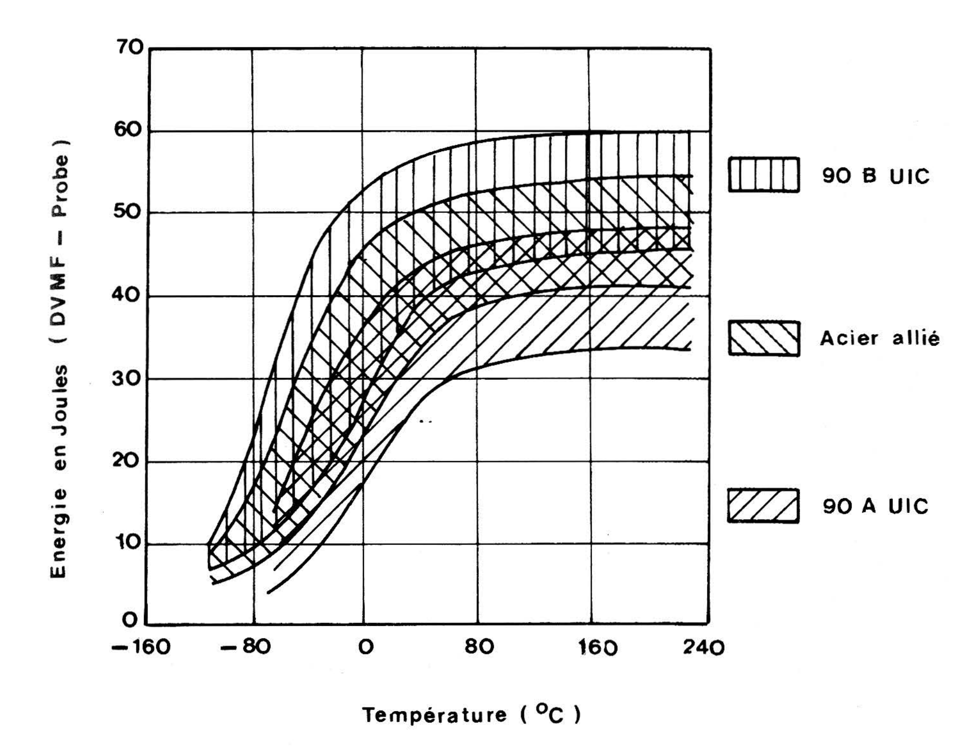


Fig. 70. — *Courbes de transition*

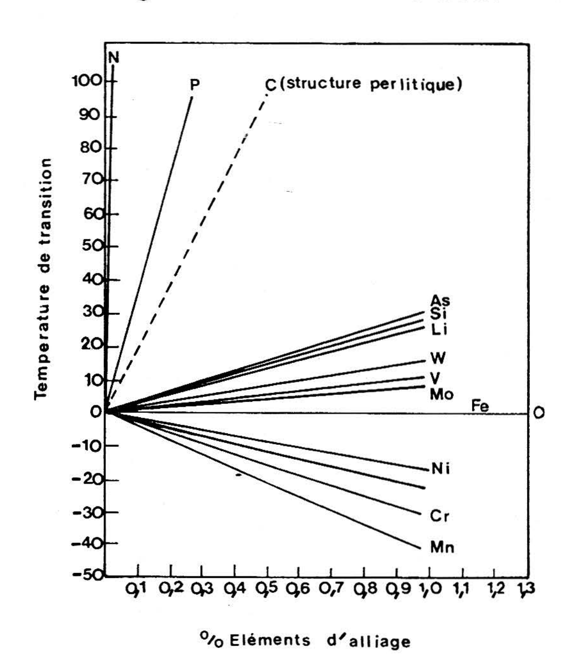


Fig. 71. — *Influence des éléments d'alliage sur la transition*

formes aux besoins des réseaux (résistance mécanique, dureté, résilience) est maintenant bien maîtrisée, il n'en est pas de même pour la ténacité, la mécanique de la rupture faisant encore à l'heure actuelle l'objet de multiples recherches.

5.6.2. La mécanique de la rupture, qui en est encore à ses débuts, suppose l'existence a priori dans le corps du matériau de microfissures, puisque les contraintes macroscopiques de ruptures sont bien plus faibles que l'énergie de liaison des atomes. A partir de ces microfissures qui existent toujours du fait de la fabrication, il y a possibilité de développement progressif jusqu'à une taille critique qui entraîne la rupture brutale.

Si la sollicitation de traction s'exerçant sur le front de fissure est faible, il y a simplement ouverture des bords ; mais à partir d'une certaine valeur, il y a progression du front de fissure, au bord duquel s'étend une zone plastique de très faible étendue.

Dans des cas simples (par exemple fissure plane à fond de fissure rectiligne), on peut calculer les contraintes et déplacements théoriques qui règnent aux abords immédiats du front de fissure (formules d'Irwin, par exemple). Sans entrer dans le détail de calculs fort complexes, nous dirons simplement que ces contraintes sont proportionnelles en chaque point à un facteur K, dit facteur d'intensité de contraintes et parfois improprement appelé ténacité. K dépend du champ de contraintes exercées sur la pièce, de la géométrie du défaut et de la géométrie de la pièce ; la connaissance de ces trois facteurs permet, au moins théoriquement, le calcul de K. Par exemple pour une fissure droite de longueur 2a dans une plaque infinie d'épaisseur unité soumise à l'infini à une traction uniforme perpendiculaire au plan de la fissure, on trouve

$$K = \sigma_\infty \sqrt{\Pi a}$$

La plaque ayant des dimensions finies, intervient un coefficient de forme α et $K_1 = \alpha\, \sigma \sqrt{\Pi a}$

Tans que σ_∞ reste faible, il n'y a pas progression de la fissure. Mais, à partir d'une valeur critique K_C il y a progression, K_C étant une valeur en principe caractéristique du matériau (8) et que l'on peut mesurer

(8) Il existe différentes méthodes de mesures décrites dans la littérature spécialisée. Un essai de flexion lente sur éprouvette Charpy, relativement peu coûteux, semble fournir une bonne estimation.

expérimentalement suivant des spécifications précises à l'aide d'une éprouvette préentaillée dans laquelle on peut calculer K, qui dans le système SI a la dimension d'une contrainte multipliée par la racine carrée d'une longueur, exprimable en mégapascals par racine de mètres.

Il est donc hautement souhaitable que le facteur critique d'intensité des contraintes de l'acier à rails soit aussi élevé que possible.

La connaissance de K_{IC} permet de calculer σ en fonction de a ou vice-versa. L'expérience montre que le facteur d'intensité de contrainte varie approximativement en raison inverse de la résistance à la rupture :

$$K = 50 \text{ MPa} \sqrt{m} \text{ pour } R = 700 \text{ N/mm}^2$$
$$K = 30 \text{ MPa} \sqrt{m} \text{ pour } R = 1\,000 \text{ N/mm}^2.$$

Ces deux valeurs de K représentent approximativement les limites extrêmes qui varient cependant légèrement avec la température. Dans le domaine d'application de la loi de Paris, on a constaté que pour $\Delta K \leqslant 10$ MPa $\sqrt{m}$, les vitesses de fissuration de la nuance 70 sont un peu plus faibles que celles des nuances 90 et sensiblement identiques pour $\Delta K > 10$ MPa $\sqrt{m}$. Par contre, le domaine de fissuration rapide conduisant à la rupture est bien plus rapidement atteint avec les nuances 90 (9).

Les valeurs des paramètres sont sensiblement les suivantes :

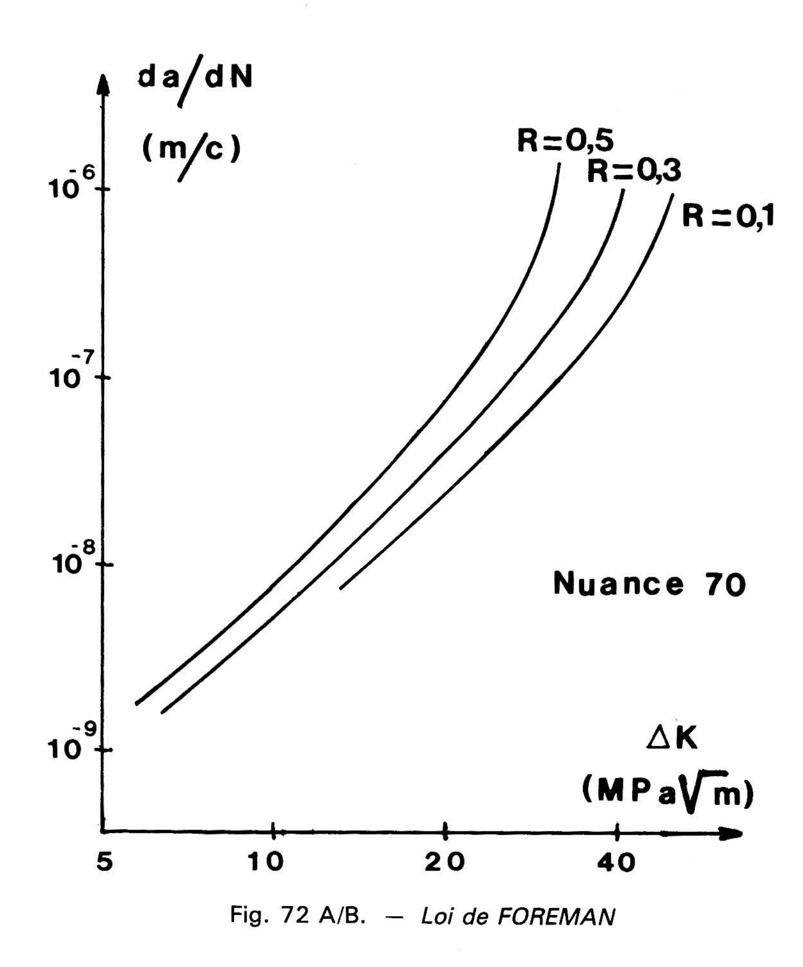
m # 2.5 C de 6.10^{-10} (nuance 70) à 2.10^{-10} (90)
et K_c de 65 (70) à 40 (90).

La figure 72 montre l'importante influence de R.

5.6.3. La théorie développée par Griffith montre que, une fois amorcée dans les conditions précédentes, la propagation de la fissure est un phénomène consommateur d'énergie, mais que cette consommation ne dépend que des surfaces nouvelles créées après propagation de la fissure. L'énergie consommée par la fissure passant d'une aire A à une aire A + dA est

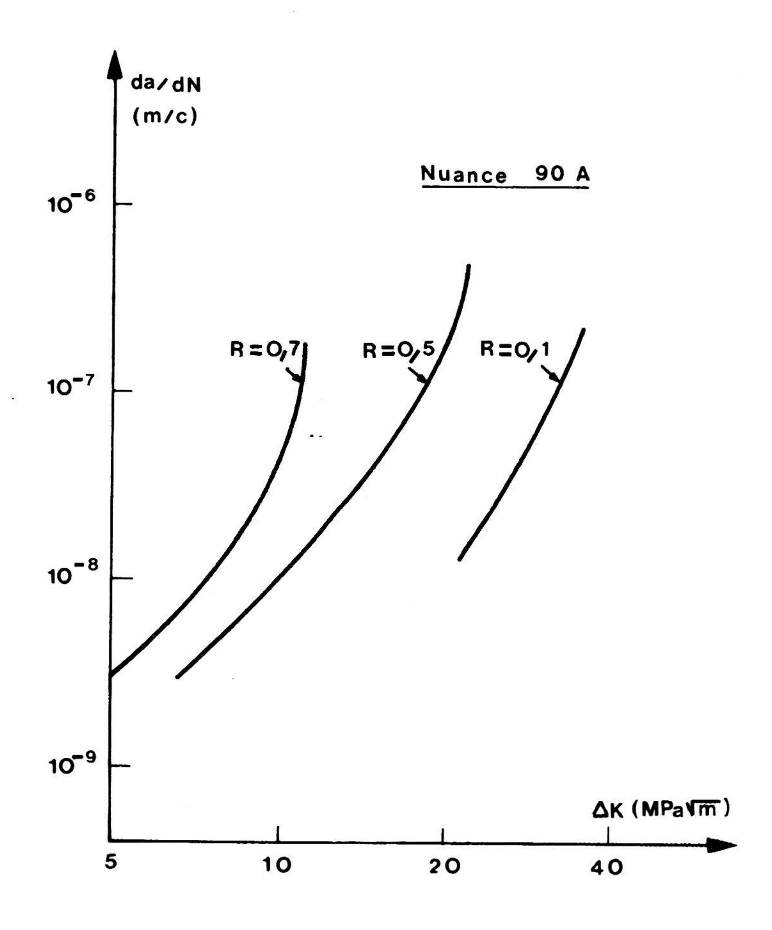
$$dW_F = 2\gamma_F \, dA$$

(9) C'est évidemment un facteur important du choix de périodicité d'auscultation des rails en fonction de leur nuance.



A   Fig. 72 A/B. — *Loi de FOREMAN*

γ_F étant une constante intrinsèque du matériau ou énergie spécifique de rupture (joules par mètre carré). Si la variation du potentiel statique total du système élastique est supérieure à dW_F, il y a progression de la fissure. On peut montrer que la progression de la fissure est commandée par la dérivée première du potentiel et que la stabilité ou l'instabilité (continuation ou arrêt de la progression) est commandée par le signe de la dérivée seconde du même potentiel. On peut relier mathématiquement γ_F au facteur d'intensité de contraintes, dans certaines conditions bien déterminées.



Vitesse de fissuration en fonction de ΔK

B

5.6.4. Le rail est soumis à des sollicitations alternées : ce sont donc des fissures de fatigue qui risquent de s'y développer. Les fissures ne se développent que lorsque l'on dépasse après amorçage une certaine amplitude du facteur d'intensité de contraintes. Par contre pour des valeurs très élevées de ΔK, il y a rupture brutale. Mais entre ces valeurs extrêmes, la propagation $\frac{da}{dN}$ (longueur par cycle de charge-

ment) suit la loi de Paris (fig. 73) établie pour la propagation de fissures de fatigue sous chargement à amplitude constante

$$\frac{da}{dN} = C\,(\Delta K)^m$$

ΔK étant la variation du facteur d'intensité de contrainte au cours d'un cycle et

m un paramètre compris entre 2 et 6 qui est le plus souvent voisin de 4. C est une constante expérimentale de l'ordre de 10^{-13} à 10^{-14}.

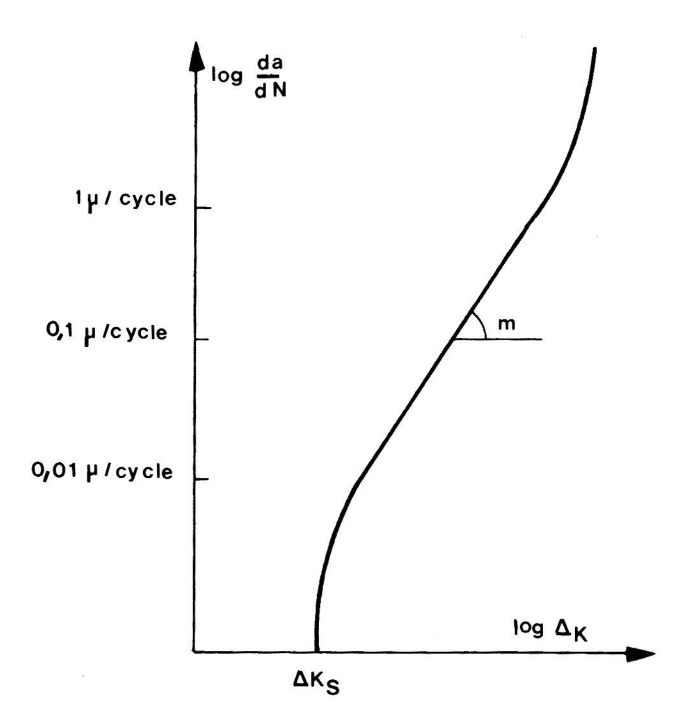


Fig. 73. — *Loi de PARIS*

En fait, on peut décomposer le phénomène de fissuration en trois stades (fig. 74) :

— un stade de propagation très lente (da/dN $< 10^{-8}$ mm/cycle)
— un stade de propagation lente
— un stade de propagation rapide conduisant à la rupture brutale (da/dN $> 10^{-3}$ mm/cycle).

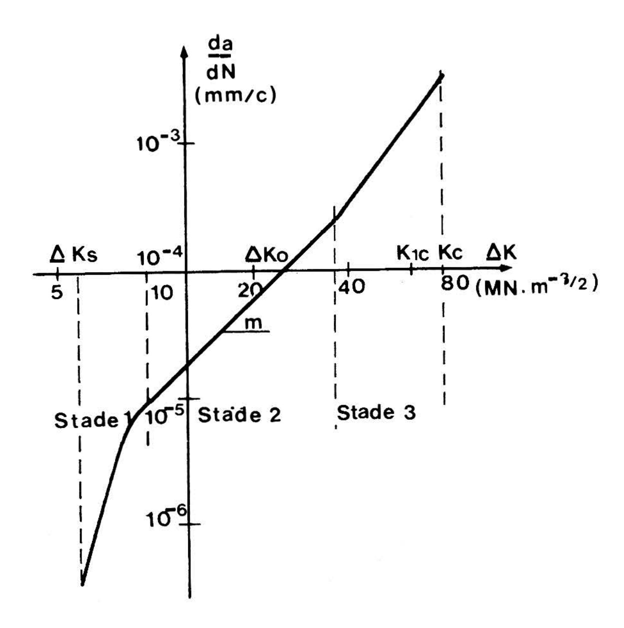


Fig. 74. — *Les divers stades de fissuration*

Le premier stade, le début de fissuration, limité inférieurement par le seuil de non-fissuration ΔK_s correspond à une accélération progressive de la fissuration.

ΔK_s dont l'ordre de grandeur est de 6,5 MPa est indépendant de la charge maximale, mais le point de passage entre le premier et le deuxième stade se déplace vers les ΔK croissant quand cette charge maximale augmente.

Le deuxième stade, de propagation lente, correspond à la relation de Paris. Il correspond à des vitesses comprises entre 10^{-8} et 10^{-6} m/cycle. Puis on arrive au dernier stade de propagation rapide de la fissure conduisant à la rupture brutale.

Celle-ci se produit pour une valeur K_c du facteur d'intensité de contrainte maximal, voisin du facteur d'intensité de contrainte K_{IC}.

Pour tenir compte de ce dernier stade de la fissuration et de l'effet de R_σ $\left(R_\sigma = \dfrac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}\right)$,

on peut utiliser la relation de Forman qui affine la loi de Paris pour les aciers à rails

$$\frac{da}{dN} = \frac{A\ (\Delta K)^n}{(1 - R_\sigma)\ K_c - \Delta K}$$

où A et n sont des constantes du matériau,

K_c est le facteur d'intensité de contrainte correspondant à la rupture brutale.

5.6.5. Bien que les nombreuses études faites donnent malheureusement des résultats très hétérogènes concernant les divers paramètres en cause, on a pu néanmoins mettre en évidence les points suivants :

— l'augmentation du rapport $R_\sigma = \sigma_{min}/\sigma_{max}$ conduit à une croissance de la vitesse de fissuration suivant la relation de Forman et à une diminution du seuil ΔK_s de non fissuration ; K_{IC} semble varier dans le même sens que l'allongement et la striction ;

— les contraintes résiduelles s'ajoutent au chargement appliqué, mais leur influence diminue quand ΔK augmente ; il y a cependant un très gros intérêt à les réduire le plus possible ;

— l'augmentation de la taille du grain d'austénite d'origine entraîne une diminution de la vitesse de fissuration et une augmentation du seuil ΔK_σ pour les valeurs faibles de R_σ (fig. 75). La diminution de l'épaisseur des lamelles de cémentite semble également avoir un effet bénéfique sur la ténacité ;

— l'augmentation de la limite d'élasticité, liée à une diminution de l'espace interlamellaire de la perlite, entraîne une légère augmentation de la vitesse de fissuration. Par contre, elle augmente le seuil de démarrage de la fissure ;

— la ferrite proeutectoïde en faible teneur pourrait entraîner une diminution notable de la fissuration ;

— la fissuration paraît plus rapide à l'air que sous vide.

La figure 76 illustre de façon claire l'influence de certains de ces paramètres, en particulier celle de la dureté de la nuance ; elle met également en évidence le seuil de développement des fissures (7 Mpa $\sqrt{m}$), un facteur d'intensité de contrainte de 50 entraînant la rupture brutale.

Enfin le tableau 13 n'a pas d'autre prétention que de donner des valeurs indicatives liées en particulier à l'état des contraintes internes. Il précise les valeurs des coefficients des droites.

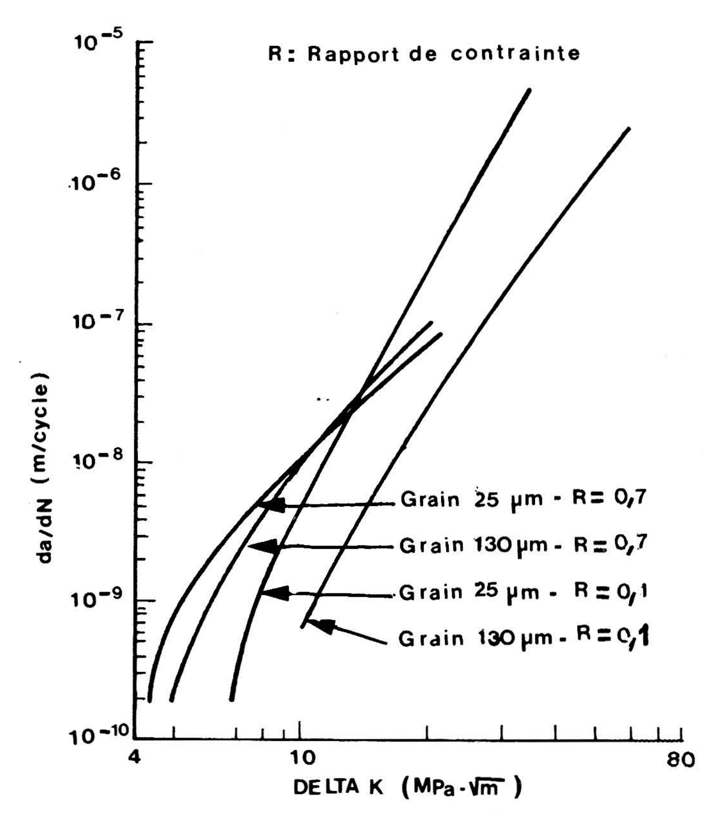


Fig. 75 A. — *Influence de la taille des grains d'austénite*

$$\frac{da}{dN} = 10^{-7} \left(\frac{\Delta K}{\Delta K_o}\right)^m$$

$\frac{da}{dN}$ étant exprimé en mètres par cycles

Nuance acier	Limite élastique en MPa	Limite de rupture	Allongement en %	Striction en %	K_{IC} limite	ΔK en MPa $\sqrt{m}$	m
70 ord.	405	765	20	39.2	62.4	28	3.3
90A oxyg.	475	940	13.6	21.8	35	22	5.1
90A élec.	470	925	13.6	21.7	48	24.5	5.9
90 B	490	925	14.4	26.1	43.5	21	5.5
Cr-Si	675	1095	9.2	16.7	34.3	23	6

TABLEAU 13

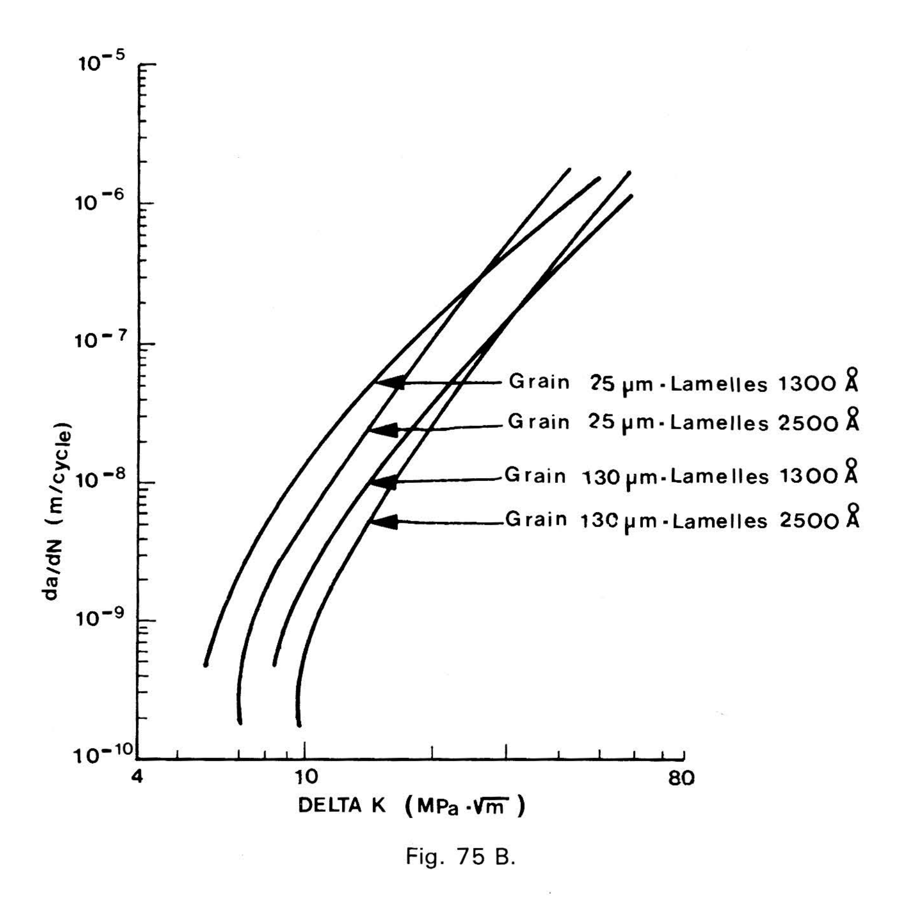
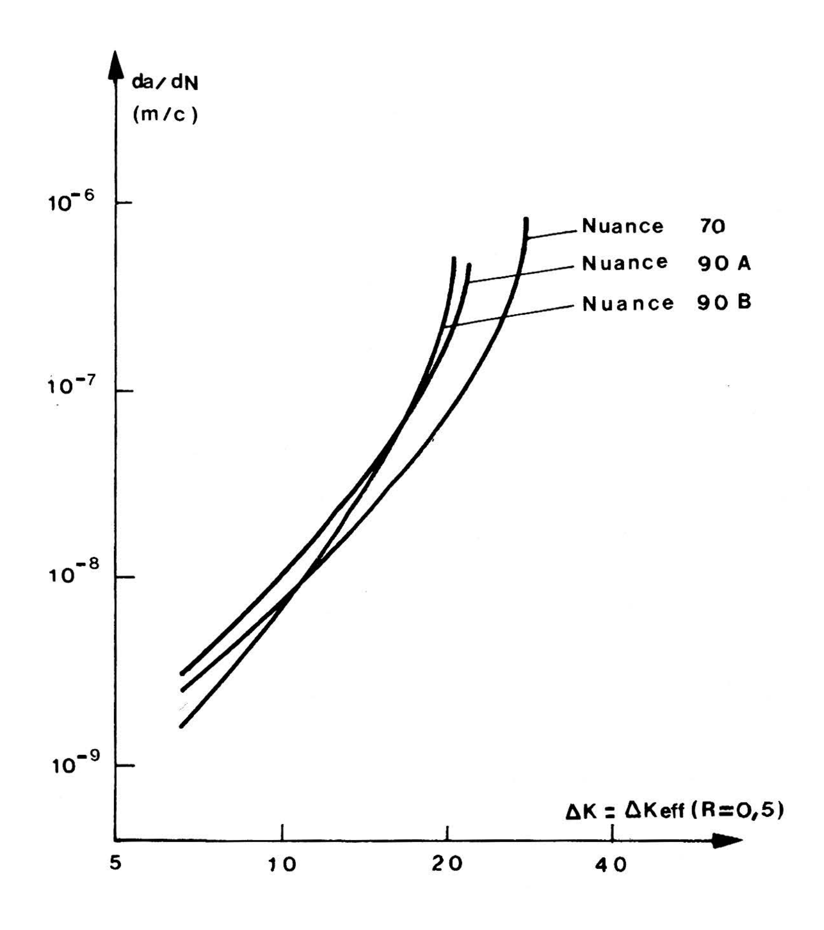


Fig. 75 B.

La poursuite du calcul, par exemple au voisinage du congé de raccordement âme/champignon à l'extrémité d'un rail, montre que pour un K_{IC} de 40, un défaut de 0,45 mm de profondeur est susceptible de se propager par fatigue sous contrainte de 200 MPa et que la longueur critique du défaut susceptible de provoquer la rupture est de 20 mm. On voit, à cette occasion, combien peuvent être nocifs des défauts de surface apparemment anodins, tels que piqûres de corrosion, rayures ou entaille provoquée par un coup de masse malencontreux. Tous les essais qui ont été effectués ont d'ailleurs confirmé l'importante influence de l'état de surface (usinage, corrosion, défauts) sur la limite de fatigue.

Il semble bien, dans l'état actuel des connaissances, que les fissures se développent le long des parties les plus faibles, c'est-à-dire la fer-



Vitesse de fissuration en fonction de ΔK eff

Fig. 76. — *Influence des nuances*

rite intergranulaire : arrivée sur un grain d'austénite d'origine, cette fissure peut bifurquer dans la ferrite intergranulaire, mais le plus souvent, elle se propage dans les couches opposées de la perlite du grain d'origine. La figure 75 montre l'importance de la taille du grain d'origine dont l'augmentation diminue la vitesse de propagation de la fissure et augmente le seuil limite du facteur d'intensité de contrainte. Par contre, la distance interlamellaire ne semble pas jouer un grand rôle.

5.8. Amélioration de la qualité de l'acier à rails

On peut à l'heure actuelle tirer des constatations précédentes les conclusions suivantes :

— Les deux qualités fondamentales, la résistance à la rupture et la ténacité sont commandées essentiellement, l'une par l'espace interlamellaire de la perlite, l'autre par la taille du grain d'austénite d'origine : on peut donc agir simultanément dans les deux directions.

— La quantité de ferrite, de plus faible résistance, joue un rôle défavorable sur les limites élastiques et de rupture. Elle peut être renforcée par des solutions solides d'alliages, mais de toute façon, l'essentiel de la résistance est bien lié à la distance interlamellaire de perlite.

— On améliore la ténacité en diminuant le pourcentage de carbone ainsi que la taille du grain d'austénite d'origine. La baisse de résistance résultant d'un taux plus faible de carbone peut être compensée par une addition de manganèse et de silicium, sans effet notable sur la ténacité. Le vanadium joue un rôle équivalent.

— L'abaissement à environ 900/950 degrés de la température de fin de laminage peut contribuer à une plus grande finesse du grain d'austénite, donc à une amélioration de la ténacité.

6. Les diverses nuances d'aciers à rails

6.1. Ces nuances ont évolué au fil des besoins et se sont progressivement concrétisées par la mise au point de cahiers des charges qui définissent les caractéristiques générales de l'acier à rails. Les plus répandus sont le cahier 860 UIC, plus particulièrement utilisé par les chemins de fer européens et les prescriptions de l'American Railway Engineering Association (AREA). Les divers cahiers reprennent d'ailleurs des nuances de types analogues et c'est donc sous cette forme globale que nous décrirons succinctement les diverses nuances.

Le tableau 14 rappelle les caractéristiques des principaux aciers à roue définis par la fiche UIC 812.3.

TYPE	% C	Resist. traction
R6	⩽ 0.48 %	780 à 900 MPa
R7	⩽ 0.52 %	820 à 940 MPa
R8	⩽ 0.56 %	860 à 980 MPa
R9	⩽ 0.60 %	900 à 1 050 MPa

TABLEAU 14

A titre d'exemple, les teneurs maximales des éléments d'addition sont :

C : 0.56 % ; Si : 0.40 % ; Mn : 0.80 % ; P : 0.035 % ; S : 0.035 % ; Cr : 0.30 % ; Cu : 0.30 % ; Mo : 0.08 % ; Ni : 0.30 % ; V : 0.05 % ; avec Cr + Mo + Ni = 0.50 %

Aucune étude n'a jusqu'à présent défini l'optimal économique du choix réciproque des nuances des aciers à roues et à rails. Nous reviendrons un peu plus loin sur ce problème.

D'une façon générale, les grandes classes de nuances d'aciers à rails utilisées dans le monde se caractérisent de la façon suivante (fig. 77 et 78) :

— les nuances dites normales, largement utilisées jusqu'à présent par les réseaux à charges par essieu modérées (20 t) mais qui dès à présent commencent à céder le pas à des nuances plus dures, mieux adaptées à l'augmentation des charges et des vitesses. Elles sont constituées par des aciers au carbone, de résistance à la rupture comprise entre 700 et 800 MPa ;

— les nuances naturellement dures, plus résistantes à l'usure, et donc bien adaptées aux courbes de rayon inférieur à 1 000 m, mais dont l'emploi commence à se généraliser dans un certain nombre de réseaux européens (DB - SNCF). Ces nuances sont à base d'aciers au carbone de résistance comprise entre 900 et 950 MPa ;

— les aciers alliés, de 1 000 à 1 100 MPa et dont il existe toute une série de variétés, basées sur les effets des éléments d'addition dans l'acier que nous avons déjà évoqués dans le présent chapitre : chrome, silicium, vanadium, nickel ;

— les aciers traités thermiquement qui dépassent le seuil du 1 100 MPa et dont l'élaboration nécessite des installations particulières dans les usines productrices.

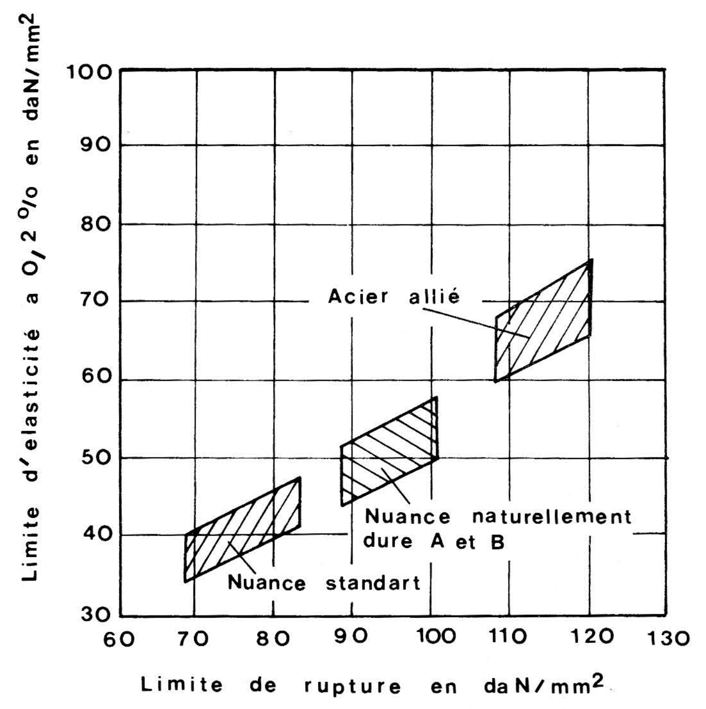


Fig. 77. — *Catégories d'aciers à rails*

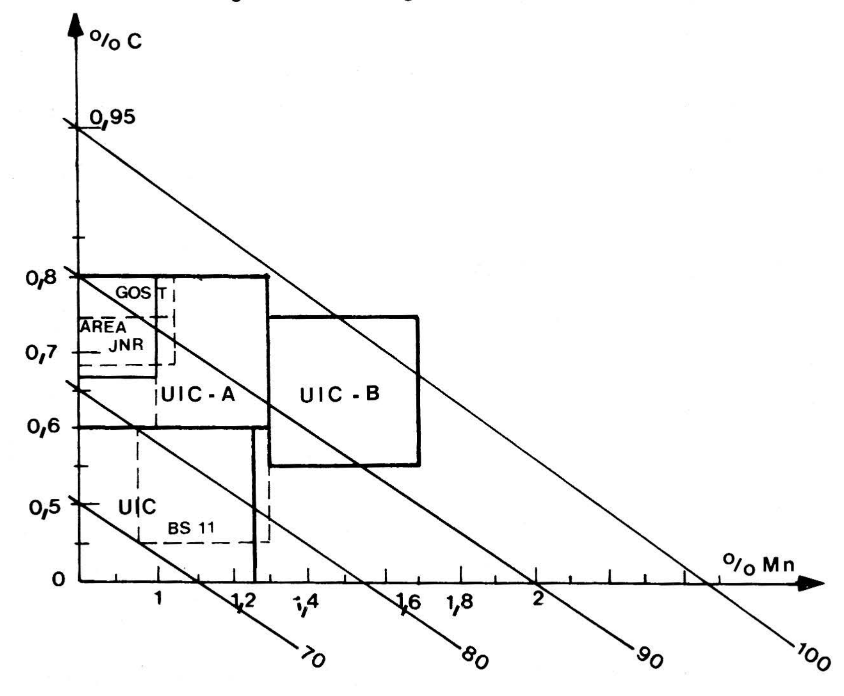


Fig. 78. — *Catégories d'aciers à rails*

Nous mentionnerons pour mémoire l'acier au vanadium (950 MPa) utilisé par la SNCF dans les aiguilles (10), acier présentant une ténacité particulière et les aciers HADFIELD utilisés pour les cœurs en acier moulé.

6.2. On retrouve dans diverses industries sidérurgiques des essais de rails de nuances diverses, en vue d'améliorer les qualités de résistance et de ténacité qui, malheureusement, ne varient pas toujours dans le même sens. Mais les additions faites sont en général sensiblement les mêmes.

En Allemagne, on a essayé des aciers perlitiques (0,7 % C, 1 % Mn, 0,7 % Si, 1 % Cr et 0,1 % V), des aciers bainitiques (0,3 % C, 1 % Si, 0,7 % Mn, 3 % Cr et 0,2 % Mo), des aciers à bas carbone (0,1 % C, 0,3 % Si, 4 à 5 % Mn et 0,1 % Nb) et des aciers austénitiques (0,7 % C, 0,4 % Si et 13 % Mn). La figure 77 représente les propriétés mécaniques générales de ces aciers.

Les premiers essais en voie ont montré l'absence de supériorité des aciers à bas carbone ; les aciers austénitiques sont à réserver aux cœurs d'appareils. Les aciers bainitiques, compte tenu du coût du traitement, sont à réserver à des cas particuliers où seraient requises des duretés très élevées. Là encore, ce sont les aciers alliés qui se révèlent les mieux adaptés économiquement aux charges lourdes et à la résistance à l'usure. Toutefois les aciers alliés, en particulier dès que Cr $>$ 1 % imposent un dégazage sous vide pour éviter les flocons d'H.

Au Canada, on peut citer des aciers miobium-vanadium (0,53 à 0,63 % C, 1,35 à 1,45 Mn, 0,1 à 0,2 Si, 0,55 à 0,65 de Cr, 0,05 à 0,08 Nb et 0,06 à 0,09 V) à 690 MPa de limite d'élasticité et 340 HB, mais difficiles à laminer, des aciers chrome-vanadium (0,70-0,80 C, 1,25 à 1,35 Mn, 0,20 à 0,40 Si, 0,75 à 0,85 Cr et 0,10 à 0,13 V) et des aciers chrome-molybdène (0,70 à 0,80 C, 0,8 à 0,9 Mn, 0,1 à 0,2 Si, 0,75 à 0,85 Cr et 0,16 à 0,20 de Mo). Tous ces aciers ont des limites élastiques à 0,2 % d'allongement de 700 à 850 MPa (jusqu'à 1 100 avec du vanadium en présence de molybdène), mais nécessitent le plus souvent un post-chauffage lors des

(10) Les talons d'aiguilles non soudés aux rails adjacents sont soumis à des chocs violents susceptibles d'entraîner des ruptures.

soudures pour éviter la formation de martensite, en particulier pour les aciers perlitiques. En outre, la présence de vanadium diminue souvent le facteur critique d'intensité de contrainte. Leur utilisation systématique reste cependant subordonnée aux résultats de leur comportement en voie, dans des conditions réelles d'exploitation.

6.3. En vue de résister aux charges de plus en plus lourdes qui circulent sur les réseaux américains, l'AREA a développé, parallèlement à la sidérurgie européenne, deux types de rails à haute résistance :

a. les rails en aciers alliés, sous trois formes :

- rails Hi Si, à haut silicium (0,50 à 1 %)
- rails dits "intermediate manganese" avec un pourcentage de Mn de l'ordre de 1,4
- rails comportant 1,31 % de chrome.

Le tableau 15 en précise les compositions chimiques moyennes :

Nuance	% C	% Mn	% P	% S	% Si	% Cr
AREA Std.	0.69/0.82	0.70/1.00	<0.04	<0.04	0.10/0.25	–
Hi-Si	0.69/0.82	0.70/1.00	<0.04	<0.04	0.50/1.00	–
Mn	0.65	1.37	<0.04	<0.04	0.10/0.25	–
Cr	0.72	0.78	<0.04	<0.04	0.25	1.31

TABLEAU 15

b. des rails traités thermiquement.

Les caractéristiques mécaniques de tels rails sont données dans le tableau 16.

Nuance	Limite élastique en MPa	Limite rupture en MPa	Allongement en %	Facteur intensité de contrainte en MPa $\sqrt{m}$
Standard	482	937	9.5	28.6
Hi-Si	488	945	10.3	20.9
Haut Mn	525	920	13.5	29.7
Cr	654	1 114	9.2	20.9
TT	869	1 220	9.5	37.4

TABLEAU 16

6.4. Le tableau 17 et la figure 78 résument ces données par une vue d'ensemble des principales nuances fabriquées dans le monde ; les caractéristiques résultant essentiellement d'essais doivent être considérées comme des valeurs moyennes.

Nuance	C %	Mn	P	S	Si	Cr	V		Elast.	Rupt.	Allon. %	Striction %	HB	Choc Joules cm²	Ténacité MPa $\sqrt{m}$
UIC	0.4 /0.6	0.8 /1.25	<0.04	<0.04	0.05/0.35				370/440	700/800	16 /22	40/45	222	80/120	67
UICA	0.6 /0.8	0.8 /1.3	<0.03	<0.03	0.1 /0.5				480/550	900/955	11 /15	20/25	277	40/60	35/45
UICB	0.55/0.75	1.3 /1.7	<0.03	<0.03	0.1 /0.5				480/530	880/980	11 /15	27/33	277	40/60	35/45
AREA Sd	0.67/0.80	0.70/1.00	<0.035	<0.037	0.1 /0.25				484/526	937/975	9.5/11.5	16/22	285	47	48
AREA 300HB	0.75/0.8	0.70/1.05	<0.035	<0.03	0.55/1.0	0.14/0.2	0.08/0.1		500/594	950/1100	11	20	320	40	42
CR Si SNCF	0.67/0.77	0.85/1.05	<0.02	<0.03	0.6 /0.8	1.00	0.08/0.1		>670	>1080	>10	15/20	330	20/40	40
BS 11	0.45/0.6	0.95/1.25	<0.05	<0.05	0.05/0.35	0.02			350/510	612/808		38			35
GOST M 76	0.67/0.80	0.75/1.05	<0.035	<0.045	0.13/0.28			AS <0.05		>820					
Si - Mn DB	0.6 /0.8	0.6 /1.3	<0.04	<0.04	0.5 /1.1					>980	10				
Cr - Mn DB	0.55/0.8	0.8 /1.3	<0.03	<0.03	0.3 /0.9	0.7 /1.3				>1080	9				
Cr - Mo USA	0.75	0.8 /1.3	<0.02	<0.02	0.2 /0.3	0.75		Mo 0.20	689/880	1110/1250	11	25	350/400		
Cr - V USA	0.7 /0.8	0.8 /1.3	<0.02	<0.02	0.2 /0.3	0.5 /0.8	0.08/0.12		740/830	1230	11	15/25	350/400	30	40
TT SNCF 1	0.606	0.85	0.03	0.024	0.308			A1 0.003	592	1002	16.6	41.3			
TT SNCF 2	0.794	0.75	0.03	0.007	0.272			A1 0.001	838	1259	14	29.4			38
CANADA TT	0.72/0.82	0.7 /1.00	⩽0.03	⩽0.02	0.7 /1.00	0.4 /0.7			784				340/390		
CANADA TT	0.70/0.82	0.8 /1.10	⩽0.03	⩽0.02	0.4 /0.6	0.4 /0.6	0.06/0.10		786				350/405		

TABLEAU 17

6.5. Rails traités thermiquement

Les premiers essais effectués en France et qui datent de 1934 ont consisté en un traitement superficiel ; le champignon du rail était trempé à l'eau, patin en l'air dès la sortie du laminage, ce qui produisait une structure sorbitique sur une épaisseur d'une quinzaine de millimètres. On a malheureusement constaté qu'au bout d'une dizaine d'années d'usage, ces rails subissaient un écaillage considérable dû vraisemblablement à la concentration des contraintes à un niveau constant par suite de l'absence d'usure et précisément à la fois dans la zone de transition entre la sorbite et la structure naturelle et dans la zone de cisaillement maximal. Il faut donc pratiquer, soit une trempe plus profonde comme le fait la sidérurgie japonaise (épaisseur de 3 à 4 cm), soit la trempe complète du rail (Rail Bethleem). Mais tout ceci nécessite des installations importantes (trempe, revenu) qui ne peuvent se justifier que si elles sont amorties sur un tonnage suffisant.

Une installation industrielle a démarré en France en 1986 pour traiter les rails au défilé par chauffage par induction au-dessus du point de transformation, suivi d'une aspersion d'eau déterminée de façon à affiner le grain perlitique sans risque de provoquer localement dans le rail des zones ayant une structure de perlite très fine résistante à l'usure et trempées ou revenues. De tels rails sont très intéressants parce que peu sensibles à l'effet d'entaille.

Dans certains cas, on peut également procéder au traitement thermique des seuls abouts de rails. La société MATIX INDUSTRIES a réalisé une telle installation (fig. 79) à l'aide d'un chauffage par induction suivi d'une trempe à l'eau pour l'atelier de Pontassieve des FS (Chemins de Fer Italiens).

6.6. Choix d'une nuance de rails

Ce choix est essentiellement lié aux problèmes d'usure en courbes que nous avons analysés au chapitre précédent.

Toutefois le choix d'une nuance dure en alignement n'avait jusqu'à présent pas fait l'unanimité devant la crainte des tractionnaires d'une usure anormale du boudin de roue dont nous avons vu que les nuances sont maintenant assez proches de celles des aciers à rails.

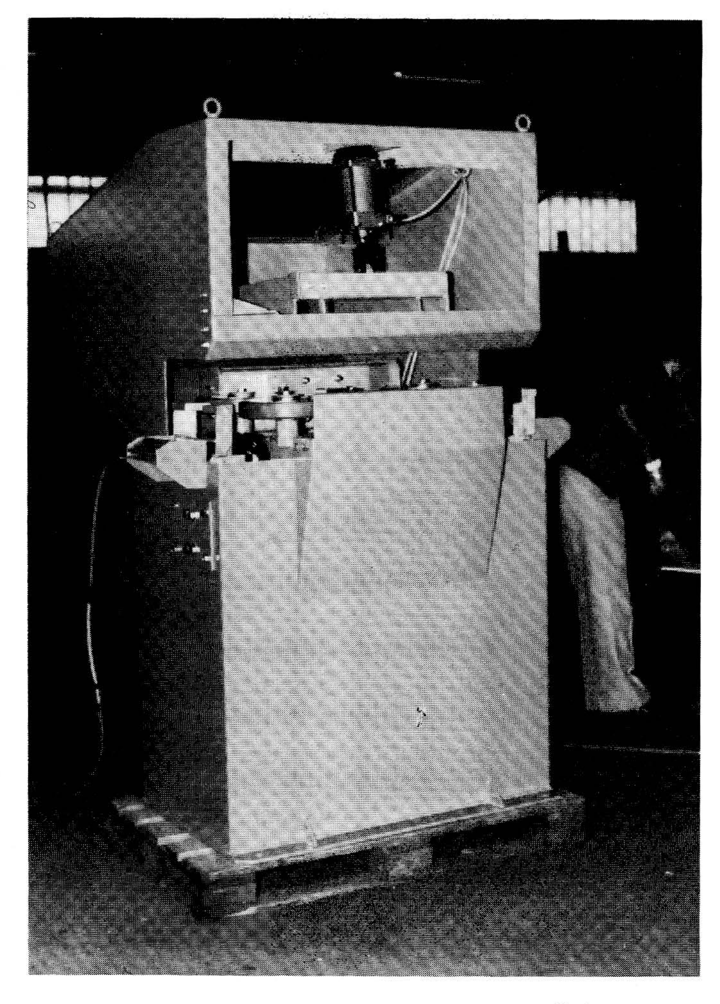


Fig. 79. — *Appareil MATIX de trempe d'abouts*

Nous constatons cependant une tendance très nette à utiliser des rails de plus en plus durs, la nuance 90 se généralisant. Les nombreuses analyses et études qui ont été faites en vue de trouver un rapport optimal entre les caractéristiques mécaniques des aciers de la roue et du rail n'ont encore abouti à aucune conclusion formelle : on a recommandé un écart de l'ordre de 20 HB et 40 HB respectivement en faveur des bandages et des roues monoblocs par rapport au rail ou une résistance supérieure d'environ 10 dan/mm², ce qui est com-

parable ; mais des analyses récentes semblent montrer que c'est l'état de surface de la roue et du rail en contact qui joue le rôle le plus important ; il sera sans doute intéressant de poursuivre les recherches dans cette voie. Seul un calcul de rentabilité basé sur l'expérience pourrait permettre dans certains cas particuliers de faire un choix économique entre les caractéristiques mécaniques de la roue et du rail, c'est-à-dire entre fréquence de renouvellements de rails et de tournages de boudins de roues. L'annexe 2 en donne un exemple schématique.

Quoi qu'il en soit, la tendance des réseaux est claire et va vers des nuances plus dures, déjà adoptées depuis longtemps par les Américains, mais avec des charges par essieux de 25 à 30 t. Or, nous avons vu l'aptitude des nuances dures à résister aux charges lourdes. La DB d'abord, la SNCF ensuite, s'orientent délibérément vers la généralisation en alignement de la nuance 90.

En courbe, les réseaux ont adopté des politiques adaptées à leurs problèmes et à leurs besoins :

- **SNCF :** nuance normale (70) et maintenant dure (90) pour les alignements et les courbes de rayon supérieur à 900 m
  nuance dure (90) pour les courbes où $300 < R < 900$ m
  nuance extra dure (110) pour les courbes où $R < 300$ m
- **DB :** nuance normale jusqu'à $R = 800$ m et maintenant nuance dure
  nuance 90 pour $500 < R < 800$
  aciers alliés pour $R < 500$ m (Cr-Mn si $R \leqslant 300$ m)
  Pour une charge d'essieu de 34 t, rail naturellement dur si $R \geqslant 800$ m et rail Cr-Mn si $R < 800$ m
- **CFF :** (Suisse) : Si le trafic est inférieur à 25 000 t/jour :
  nuance normale si $R \geqslant 600$ m
  nuance naturellement dure si $R < 600$ m
  Si le trafic est supérieur à 25 000 t/jour :
  nuance naturellement dure si $R \geqslant 350$ m
  rail allié au Cr-Mn si $R < 350$ m
- **UIC :** La figure 80 illustre la règle proposée par l'UIC. Il n'est pas exclu cependant, comme déjà dit, que certains réseaux n'abandonnent la nuance normale, au moins pour les lignes à trafic journalier supérieur à 25 000 ou 30 0000 tonnes.

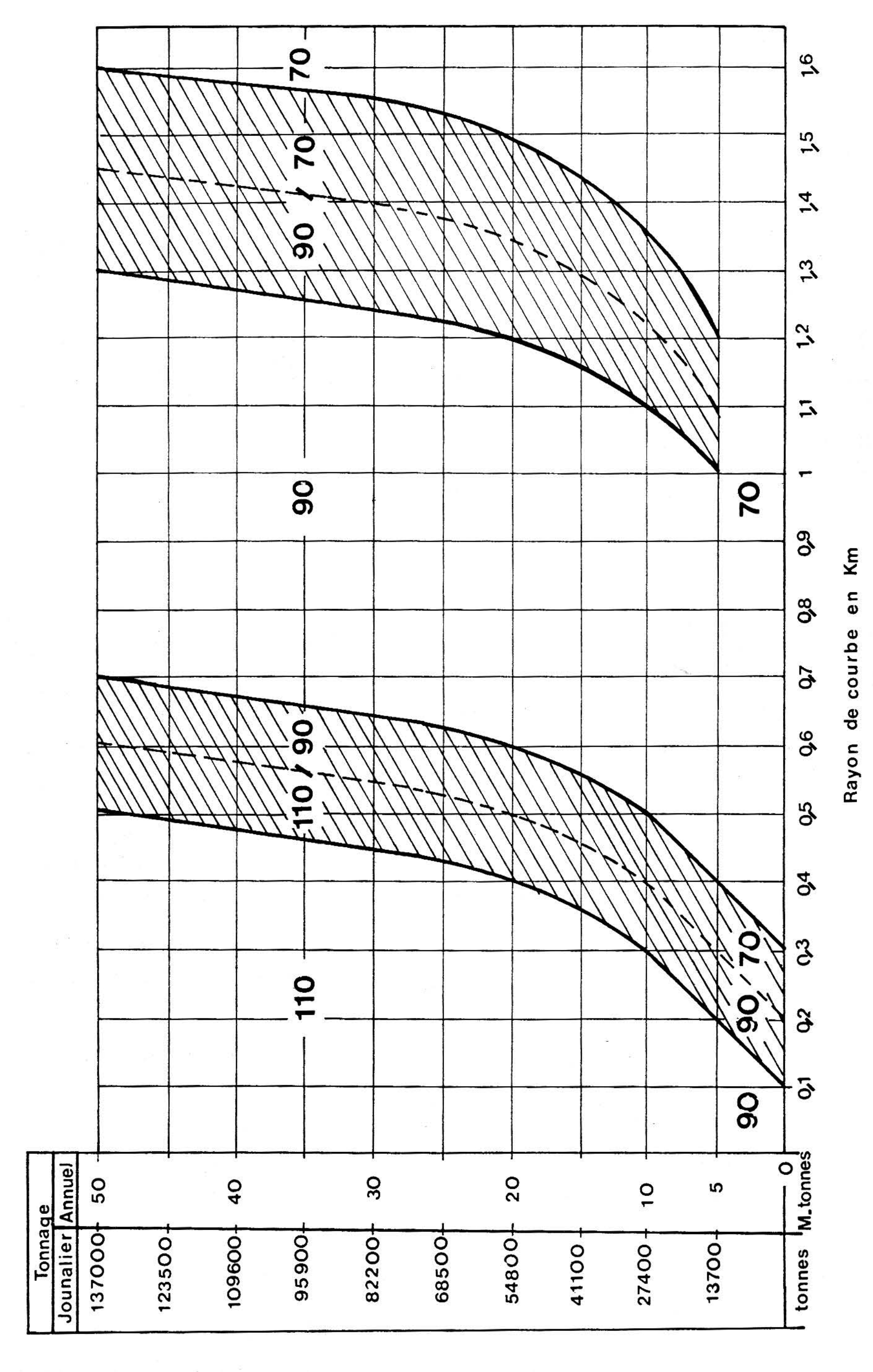


Fig. 80. — *Règles de pose UIC*

7. Fabrication des rails

7.1. Affinage de la fonte

7.1.1. Dans l'état actuel de la technique, les procédés d'élaboration des aciers par réduction directe du minerai ne sont encore que très peu développés ; il est donc nécessaire de produire dans un haut fourneau un alliage de fer et de carbone, par réduction du minerai de fer par du coke avec un appoint de fuel-oil. Le produit ainsi obtenu appelé fonte de haut fourneau a la composition moyenne suivante :

- carbone 3,5 à 4 %
- silicium 0,40 %
- manganèse 0,4 à 1 %
- soufre (apporté avec le coke) 0,04 %

éventuellement

- phosphore (apporté par le minerai) 1,75 % dans le cas de minerai phosphoreux.

La fonte, en provenance du haut fourneau, est versée dans une poche où une désulfuration partielle est effectuée au moyen de carbonate de soude.

L'affinage de la fonte a pour objet d'abaisser les teneurs en carbone et en silicium jusqu'aux valeurs correspondant à celles des aciers et d'éliminer le phosphore dont la présence dans l'acier lui confère une fragilité excessive.

Pour ce faire, on peut opérer par dilution, procédé pratiquement abandonné ou par combustion.

7.1.2. Procédés par dilution

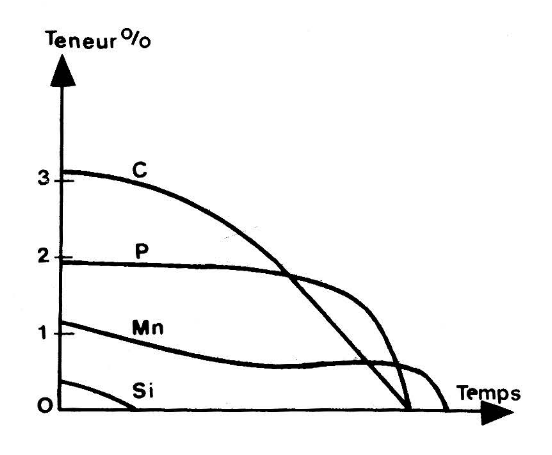
Ces procédés consistent à ajouter à la fonte liquide des ferrailles ou du minerai en vue d'abaisser la teneur en carbone.

7.1.3. Procédés par combustion

Le grand mérite de BESSEMER est d'avoir reconnu dès 1856 que la combustion des métalloïdes contenus dans la fonte dégage suffisam-

ment de chaleur pour maintenir l'acier à l'état liquide quand on y insuffle de l'air. Comme le montre la figure 81, l'ordre chronologique de combustion des éléments est le suivant : le silicium brûle d'abord, suivi du carbone et enfin du manganèse. Perfectionné par THOMAS et GILCHRIST en 1878, ce procédé permet aussi de traiter les fontes phosphoreuses. La déphosphoration n'est possible qu'en milieu basique (revêtement de la cornue) en présence d'un laitier riche en chaux suivant la réaction

$$5\ FeO + 2\ P + 3\ Cao \rightleftarrows P_2\ O_5,\ Cao + 5\ Fe$$



Courbes d'affinage au convertisseur basique

Fig. 81. — *Courbes de combustion dans le procédé BESSEMER*

Cette réaction ne peut se produire qu'en présence de laitier liquide (1 550°). Cette température n'étant atteinte qu'après combustion totale du manganèse, du silicium et du carbone, la déphosphoration, qui n'a lieu qu'en fin d'opération, entraîne une certaine oxydation du métal (fumées rousses au cours de la dernière phase, le sursoufflage).

A la fin de l'opération, la déphosphoration étant terminée, l'acier est très oxydé et l'on compense cette oxydation par addition d'éléments désoxydants (ferro-manganèse). La solidification d'un acier insuffisamment calmé s'accompagne d'un dégagement d'oxyde de carbone, dégagement d'autant plus violent que l'acier est plus riche en car-

bone. Il faut empêcher ce dégagement de gaz en neutralisant l'oxygène, c'est-à-dire en lui ajoutant du ferro-silicium, puis de l'aluminium qui réduisent l'oxyde de carbone. Toutes ces additions entraînent la formation d'inclusions non-métalliques de silicates, de sulfures et d'alumine. On peut rencontrer des inclusions ayant, après laminage, de 500 à 2 000 μ de longueur et jusqu'à 200 μ d'épaisseur. Ce sont essentiellement des silicoaluminates et des silicates de manganèse, parfois associés à de l'alumine, de la galaxite ($Mn\ Al_2\ O_4$) ou des sulfures de manganèse. Ces inclusions peuvent également se présenter sous forme d'alignement de petites inclusions de même nature, 50 à 150 μ de longueur et 20 à 50 μ d'épaisseur, ou sous forme de chapelets d'alumine. Ces alignements présentent autant de risque que les grosses inclusions.

Ces inclusions qui diminuent les propriétés mécaniques de l'acier sont inséparables du processus d'élaboration. On pallie cet inconvénient en favorisant la formation d'inclusions les mieux adaptées possible aux conditions d'emploi du produit : les aciers destinés à la fabrication de tôles sont calmés à l'aluminium, car les aluminates s'aplatissent au cours du laminage ; le calmage au ferro-silicium engendre des silicates à bas point de fusion qui s'étirent dans le sens du laminage. De plus, ces inclusions, de masse spécifique inférieure à celles de l'acier décantent tant que le métal n'est pas solidifié. Elles sont en tout cas d'autant moins nocives qu'elles sont plus dispersées. En ce qui concerne les rails, on emploie généralement un calmage mixte silicium-aluminium.

Chronologiquement, les procédés d'affinage des fontes phosphoreuses qui constituent la totalité de la production du Bassin lorrain ont été les suivants :

a. *Procédé THOMAS*

Ce procédé a été systématiquement utilisé en France pour la fabrication des rails jusqu'en 1973. Il mettait en œuvre des cornues pouvant contenir entre 20 et 50 tonnes de fonte liquide. Après chargement d'une quantité de chaux suffisante pour fixer l'anhydride phosphorique qui se forme au cours de l'élaboration et remplissage de fonte liquide préalablement désulfurée au carbonate de soude à la sortie du mélangeur — cylindre de 1 500 à 2 000 tonnes qui emmagasine la fonte du haut fourneau — de l'air est insufflé par le fond de la cornue pour brûler les métalloïdes dans l'ordre indiqué par la figure 81 le phosphore brûlant en dernier lieu. Le bain est alors décrassé pour éliminer la scorie phosphoreuse — employée ensuite comme engrais. Le contenu est basculé dans une poche de coulée dans laquelle on

ajoute simultanément le ferro-manganèse destiné à désoxyder le bain et les produits de calmage (ferro-silicium, puis aluminium) pour réduire l'oxyde de carbone formé.

b. *Procédés d'affinage par soufflage à l'oxygène pur*

Un des inconvénients du procédé THOMAS est que l'on insuffle dans la cornue de l'air qui contient 79 % d'azote ne participant à aucune réaction et dont la présence à l'état résiduel est néfaste pour certaines applications, en raison d'une tendance au vieillissement des produits obtenus. Certes, au cours des 30 dernières années, on soufflait de l'air enrichi contenant 30 % d'oxygène, mais ceci ne constituait qu'une demi-mesure. C'est pourquoi, après des essais infructueux de soufflage par le fond à l'oxygène pur ayant entraîné une destruction rapide des fonds par l'oxyde de fer formé à l'impact de l'oxygène et du fait de l'importance des températures atteintes, on a mis au point divers procédés. Dans le procédé LD (LINZER-DUESENVERFAHREN ou LINZ-DUERRER), l'oxygène est soufflé à l'aide d'une lance introduite par le bec d'une cornue dont le fond ne comporte plus de trous.

La distance de la lance à la surface du bain est un paramètre important de l'opération. Quand la lance est éloignée du bain, il se forme une scorie très fluide, donc apte à la déphosphoration, tandis que lorsque la lance s'en rapproche, le jet pénètre au sein de la masse liquide favorisant l'oxydation, donc la décarburation.

Un réglage approprié de la lance au cours de l'opération permet de porter la scorie à une température telle qu'elle soit très réactive, provoquant ainsi la combustion du phosphore avant celle du carbone, contrairement à ce qui a lieu dans le procédé THOMAS.

Il est donc possible de ce fait d'arrêter l'insufflation d'oxygène alors que la charge contient encore suffisamment de carbone ; c'est ce que l'on appelle "l'arrêt direct de la charge". La relation de VACHER-HAMILTON qui relie les quantités de carbone et d'oxygène présentes dans le bain (fig. 82) (11) montre que dans ces conditions, la teneur en oxygène de ce dernier est très faible. La quantité d'additions à faire pour ajuster la composition chimique à la valeur désirée et pour désoxyder le bain est notablement inférieure à celle demandée par le procédé THOMAS ; la quantité d'inclusions formées est donc for-

---

(11) Les concentrations en % (C) et (O) sont liées par la relation approximative (C).(O) = 25.10 puissance − 4.

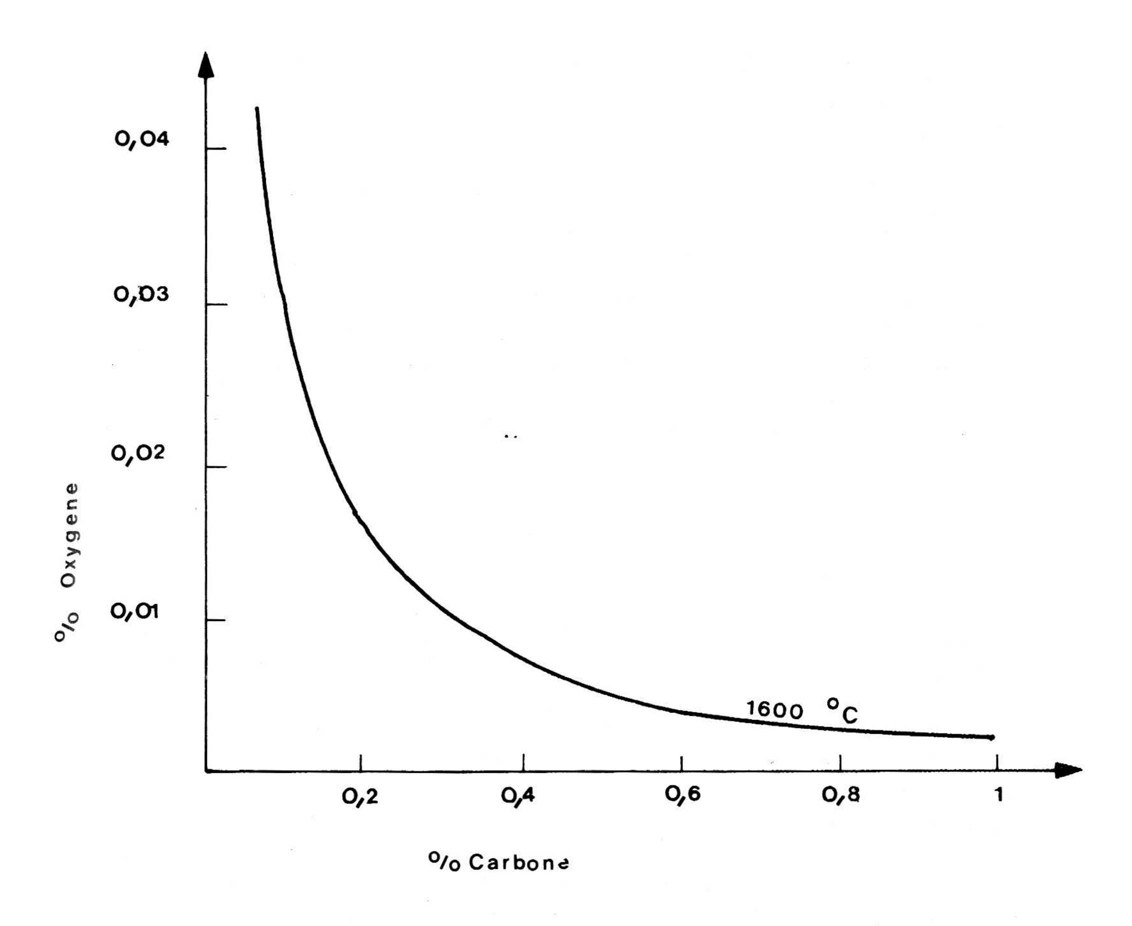


Fig. 82. — *Courbes VACHER-HAMILTON*

tement diminuée. Le procédé LD ne convient malheureusement pas pour les fontes très phosphoreuses, car la scorie nécessaire pour la déphosphoration doit être en quantité telle qu'elle réagit mal et en l'absence du brassage intense provoqué par le vent du convertisseur THOMAS classique, il devient difficile d'obtenir une déphosphoration assez rapide par rapport à la décarburation pour qu'elle s'achève sans une suroxydation exagérée entraînant des pertes en fer importantes dans la scorie. Il fallait donc trouver un moyen d'accélérer la formation d'une scorie réactive ou de créer un brassage énergique entre

métal liquide et scorie formée. Des procédés employés jusqu'à maintenant, il semble que seuls aient un avenir les procédés LD-AC et OLP (oxygène-lance-poudre) dans lesquels de la chaux finement divisée est mise en suspension — mécaniquement dans le premier procédé, pneumatiquement dans le second — dans l'oxygène insufflé, ce qui lui confère une très grande réactivité. La figure 83 donne l'ordre de combustion des métalloïdes dans le cas du procédé OLP. Il faut noter en outre la possibilité de limiter les températures atteintes par fusion de ferrailles ou de minerais, ce qui améliore les bilans thermique de ces procédés. Le four KALDO qui a eu une certaine vogue a été abandonné, car très cher d'entretien, la rotation de 1 000 tonnes à 30 tours par minute entraînant en particulier une usure rapide des réfractaires.

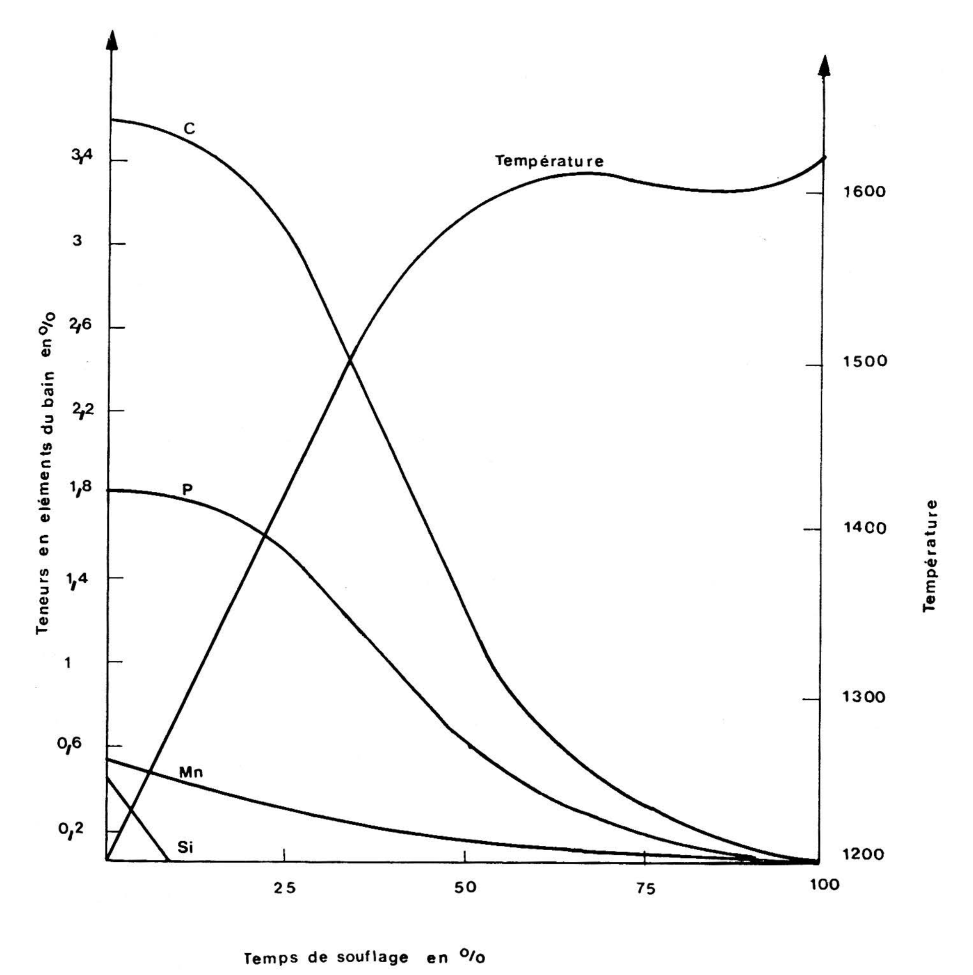


Fig. 83. — *Courbes de combustion dans le procédé OLP*

A UNIMETAL, l'élaboration est faite en deux phases :

Première phase :

Le taux d'injection d'oxygène est de 900 mètres cubes par minute. Aucune addition de chaux n'est nécessaire du fait de l'utilisation de 40 à 50 t de laitier de la deuxième phase de la coulée précédente. Une dizaine de minutes après achèvement de l'injection d'oxygène, la composition chimique est de 0,9 % de C et 0,25 % de P et la température 1 590 degrés. On ne conserve dans le convertisseur que 5 à 10 t de laitier qui contient environ 8 % de Fe et 20 % de phosphates. On complète par une addition de chaux avant la deuxième phase.

Deuxième phase :

Le flot d'injection d'oxygène est de 600 m^3/minute. On rajoute une douzaine de tonnes de chaux en poudre et en morceaux. Le courant d'oxygène est alors relevé à 1 100 m^3/min pour accélérer la décarburation.

Au bout de quelques minutes, on arrête l'injection, la composition de l'acier étant approximativement la suivante :

C : 0,05 %   P : 0,02 %   S : 0,02 %   Mn = 0,09 %.

Pendant la coulée, on ajoute de l'aluminium en vue de réduire à 0,05 % le taux d'oxygène.

Il faut mentionner que les convertisseurs OLP d'UNIMETAL sont équipés du système LBE. Le procédé (lance-brassage-équilibre) a pour objectif d'amener à l'équilibre les réactions d'oxydation. On insuffle de l'azote ou de l'argon au travers de tampons poreux au bas du convertisseur, ce barbotage facilitant le développement des réactions.

Par rapport aux convertisseurs THOMAS, le développement de l'affinage à l'oxygène pur a permis d'accroître la grandeur des cornues dont la charge atteint couramment 260 t. De telles dimensions de cornues, jointes à la nécessité de placer au-dessus des lances à oxygène, n'ont pas permis d'utiliser les bâtiments anciens et ont imposé la création d'usines nouvelles. La nécessité de dépoussiérer les fumées pour lutter contre la pollution atmosphérique en imposant la construction d'énormes dépoussiéreurs a joué également dans le même sens. Toutefois, afin de faire bénéficier les installations THOMAS dont la transformation ne pouvait être envisagée pour des raisons financières, de certains avantages de l'affinage à l'oxygène pur (bon rendement, additions supplémentaires de ferrailles et absence d'azote), on a imaginé de souffler par le fond de l'oxygène pur tandis que par des tubes concentriques à ceux amenant cet oxygène, arrivent des

gaz ou des fluides qui, à ces températures, produisent des réactions endothermiques de craquage. La température est ainsi suffisamment abaissée pour ménager l'ensemble de l'installation. Il s'agit des procédés OBM et LWS.

Les procédés THOMAS et MARTIN ont actuellement disparu.

85 % des aciers produits dans le monde sont maintenant affinés par soufflage à l'oxygène, le restant étant élaboré essentiellement au four électrique.

7.2. Coulée

A l'heure actuelle, la coulée en lingotières est pratiquement remplacée par la coulée continue.

7.2.1. Coulée en lingotière

L'acier élaboré dans le convertisseur est versé dans une poche de coulée d'où il est transvasé dans des moules pyramidaux à fond mobile, appelés lingotières. Leur section est carrée et elles contiennent de 5 à 10 t d'acier. Une coulée donne ainsi, selon le procédé, de 8 à 30 lingots.

Un certain nombre de phénomènes fâcheux se produisent dans la lingotière :

- ségrégation provoquant la concentration des impuretés plus légères et dont le point de fusion est plus bas que celui de l'acier, dans les régions centrales et supérieures ; ces ségrégations contiennent essentiellement du soufre, du phosphore et du carbone.
- formation d'un creux ou retassure à la partie supérieure du lingot par suite de la différence de volume entre l'acier liquide et l'acier solide et de l'inégalité de refroidissement des différentes couches, la ségrégation qui vient d'être mentionnée accompagnant la retassure.

La partie supérieure du lingot est donc très hétérogène et ne peut être utilisée pour la fabrication des rails ; un chutage de 9 % de la longueur est pratiqué par les aciéries, afin d'éliminer avec certitude les défauts de tête qui entraînent des avaries de rails. Une plus grande

sévérité, introduite récemment dans le choix des macrographies limites, conduit d'ailleurs les aciéries à apporter une particulière attention à la partie supérieure des lingots.

L'utilisation du masselottage, qui consiste à poser des plaques isolantes dans la partie supérieure des lingotières et à recouvrir la surface de l'acier dès la fin du remplissage par une poudre exothermique, permet de conserver liquide la tête du lingot et d'empêcher la formation du creux.

En outre, pour empêcher des avaries de surface, on utilise systématiquement des lingotières laquées et on dispose dans le fond un matelas de carton ou de paille qui forme brise-jet et évite la projection de gouttelettes qui, brutalement refroidies, se détacheraient ensuite de la surface de lingot.

7.2.2. Coulée continue

La coulée en lingotière impose ainsi un chutage sur chaque lingot qui entraîne d'importantes pertes de métal et d'énergie.

Pour réduire ces pertes, on a cherché à couler l'acier dans une lingotière sans fond où le lingot est tiré vers le bas. Ceci est réalisé dans une installation de "coulée continue" (figures 84, 85 et 86) qui comprend essentiellement un certain nombre de "veines" (2,4 ou 5 suivant les machines) constituées chacune d'une lingotière en cuivre énergiquement refroidie, disposée au-dessus de chemins de roulement curvilignes destinés à soutenir les blooms que l'on tire vers le bas au cours de leur refroidissement à cœur. L'ensemble de ces veines est surmonté d'un bassin horizontal ou "répartiteur" rempli par les poches de coulée et qui sert à alimenter de façon continue les lingotières en acier liquide.

Pour adapter le débit de la coulée à la cadence de l'aciérie, on interpose entre les convertisseurs et la poche alimentant le répartiteur un "four-poche" qui est en fait un four électrique mobile dans lequel se font les réactions de calmage et d'ajustement exact de la composition chimique (métallurgie en poche). Une installation de ce type nécessite un réglage et un respect très stricts des températures de fonctionnement. Le refroidissement dû aux transvasements successifs étant important, il est nécessaire de couler très chaud, ce qui présente d'ailleurs l'avantage de favoriser la décantation des inclusions. La constance de la température dans le répartiteur garantit une grande

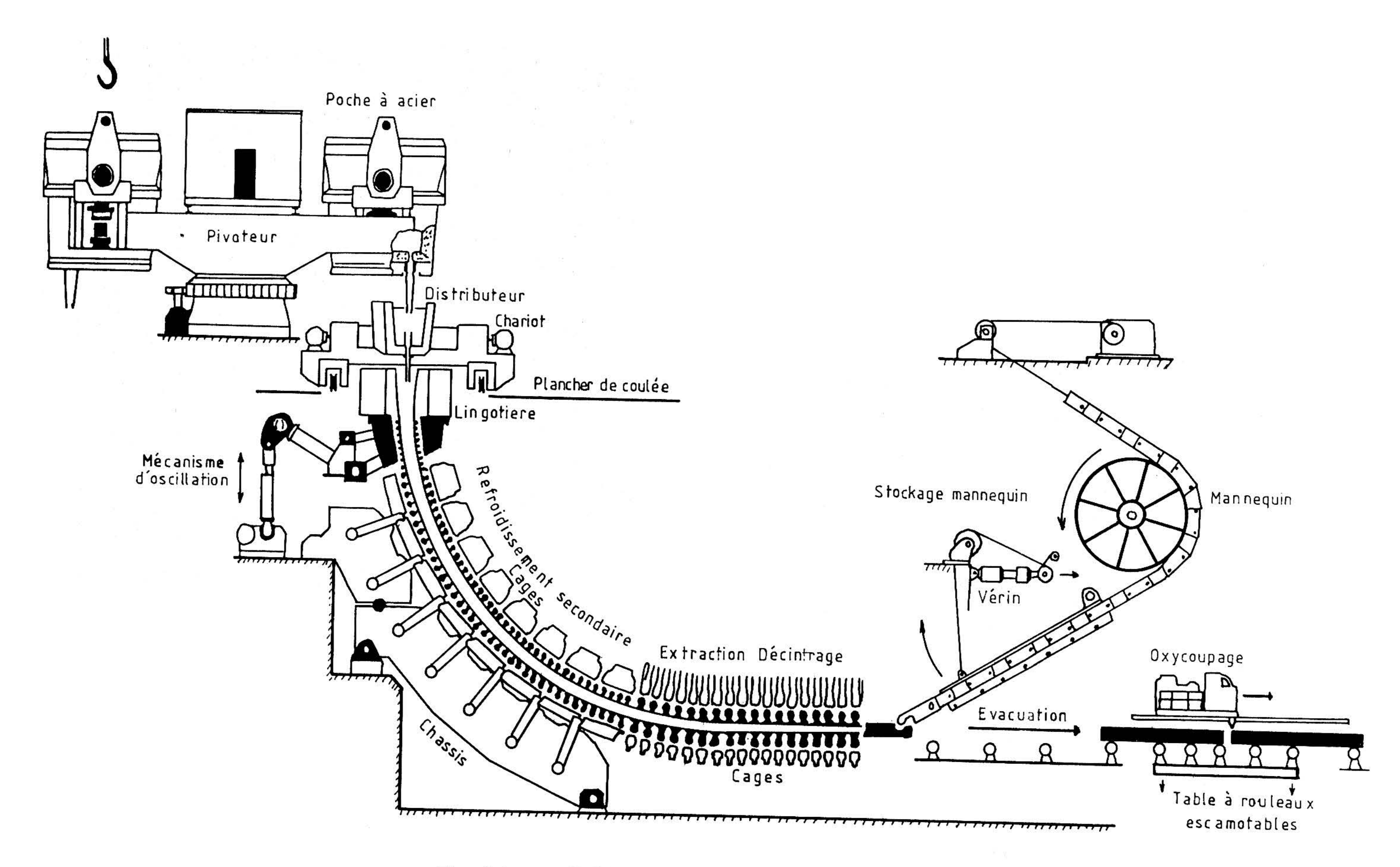


Fig. 84. — *Schéma de coulée continue*

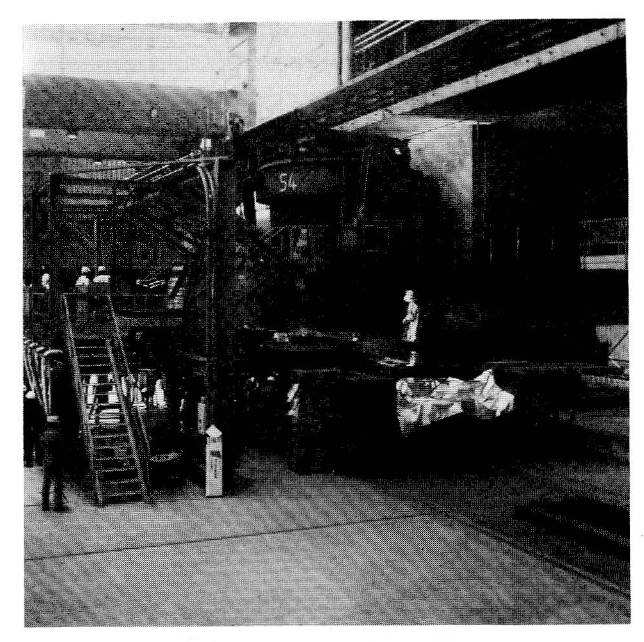


Fig. 85. — *Répartiteur de coulée continue*

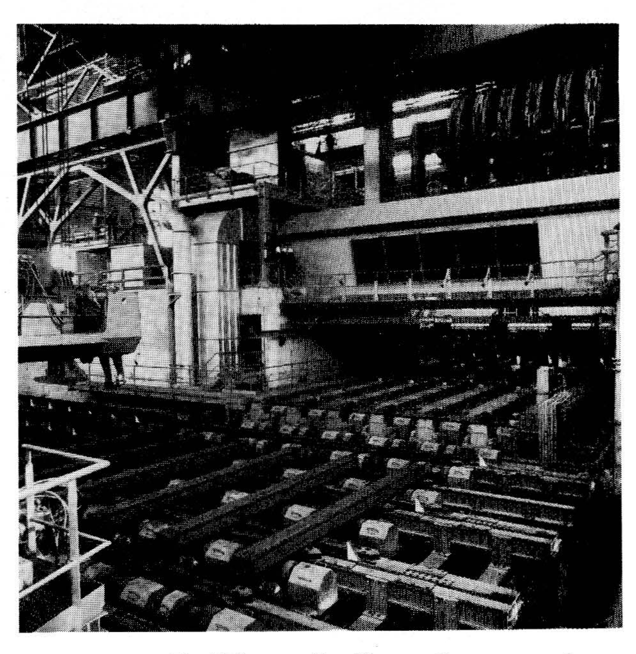


Fig. 86. — *Coulée continue*

homogénéité des produits, ce qui n'est pas toujours le cas lors de la coulée en lingotières à partir de convertisseurs de grande capacité.

Notons enfin que si, théoriquement, les blooms produits par ce mode de coulée peuvent avoir une longueur indéfinie, pour des raisons de manutention ou de réchauffage ultérieur avant laminage, ceux-ci sont tronçonnés en longueurs de 6 à 10 mètres.

7.2.3. Nous décrirons plus en détail le processus de coulée mis au point par UNIMETAL (fig. 87).

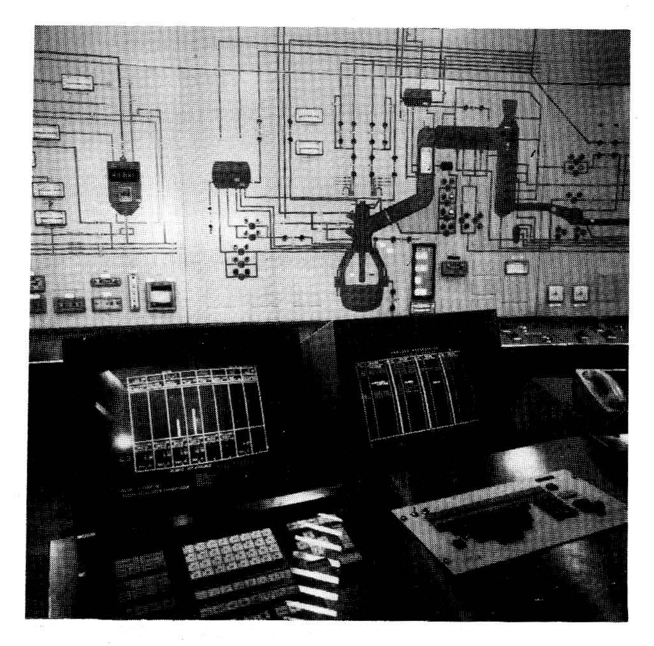


Fig. 87. — *Salle de contrôle en aciérie*

On procède dans la poche de coulée à des additions

— aluminium et ferro-silicium pour désoxyder (% final d'O : 0,015)
— de carburation en limitant la teneur en hydrogène de la poudre à 0,2 %
— de ferro si pour ajustement à la composition demandée.

Le contenu est alors transvasé dans une deuxième poche, ce qui permet l'élimination complète du laitier.

Dans cette deuxième poche, dont la capacité est de 260 t, on procède à un brassage magnétique de l'acier et à son réchauffage au moyen d'électrodes. Cette deuxième poche permet également de procéder aux additions nécessaires pour ajuster la désoxydation et la composition finale de l'acier.

Les additions les plus courantes sont du ferro-manganèse pour les qualités UIC et AREA résistantes à l'usure et du Cr et V pour des rails à haute résistance.

Lorsque l'opération est achevée, on procède à une analyse chimique permettant toute correction nécessaire.

La précision de température finale est excellente (plus ou moins trois degrés C).

L'opération est complétée par un dégazage sous vide (fig. 88) qui joue un rôle fondamental pour la qualité finale du produit. La durée du dégazage à 1,4 millibars avec barbotage d'argon est de

— 20 minutes pour les nuances résistant à l'usure
— 30 minutes pour les nuances à haute résistance.

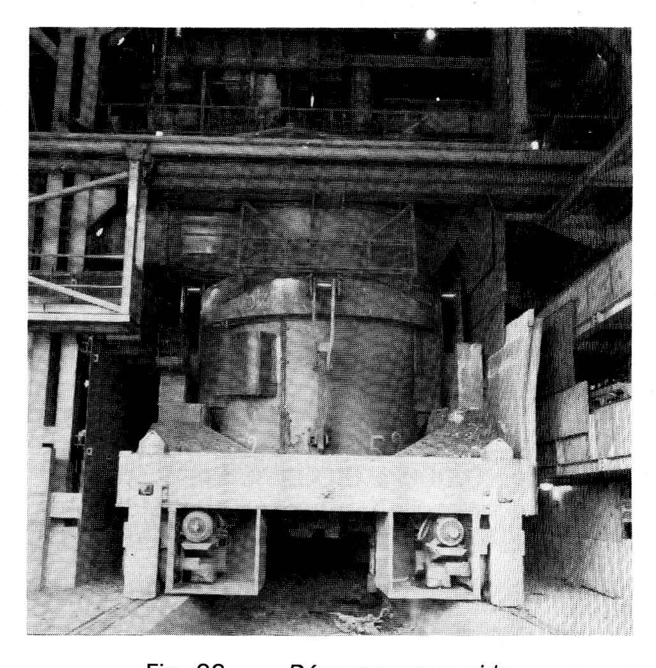


Fig. 88. — *Dégazage sous vide*

La réduction de la quantité d'hydrogène est très significative : d'une valeur moyenne de 4 ppm (12) avant traitement, la quantité moyenne tombe à 1,5 ppm après traitement pour les nuances résistantes à l'usure. La fig. 89 illustre ce phénomène.

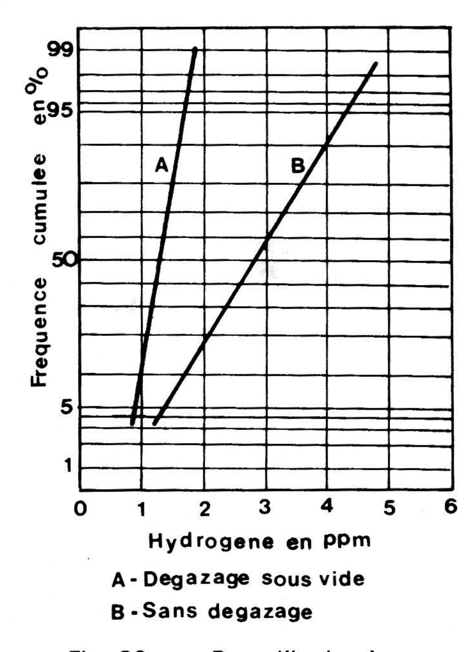


Fig. 89. — *Ppm d'hydrogène*

Avec un vide de 0,5 torr (1 torr = pression de 1 mm de mercure soit 1.3.10 puissance −2 Pa) on obtient un taux d'H inférieur ou égal à 2 ppm, alors que la nocivité des flocons d'H commence à se manifester à 3 ppm.

Le taux d'oxygène par dégazage sous vide dans les mêmes conditions ne dépasse pas 0,008 à 0,002 %.

(12) ppm : partie par million en masse hydrogène/métal.

7.2.4. *Intérêt des méthodes actuelles*

On voit donc qu'à l'opération d'affinage dans le convertisseur, caractéristique de la sidérurgie ancienne, on a substitué une métallurgie fine dans la poche de coulée où l'on est maître à la fois de la température, de l'analyse chimique, du dégazage et de la décantation, le tout complété par des analyses en temps réel. La figure 84 montre l'ensemble de coulée.

Outre une amélioration des rendements et une diminution des rebuts qui apportent un intérêt économique évident, la voie suivie par SIDELOR que l'on retrouve d'ailleurs dans toute sidérurgie moderne est très bénéfique pour la qualité de l'acier à rails qu'elle produit :

— composition chimique : les écarts types pourcentage des divers éléments de l'alliage sont réduits de deux à trois fois par rapport à la voie lingot, d'où un comportement plus régulier du rail en voie,

— pureté du métal : contrairement à ce que l'on a pu penser initialement, cette pureté est améliorée ; la décantation des inclusions est meilleure que dans les autres procédés et le métal liquide, même en cours de transvasement, reste protégé contre toute réoxydation intempestive. Les inclusions sont plus finement réparties. Les silicates de manganèse et les silicoaluminates doivent être particulièrement évités, compte tenu de l'effet d'entaille qu'ils créent par leur forme. La quantité d'inclusions de taille supérieure à 50 μ est approximativement divisée par 4 et celle d'inclusions de taille supérieure à 10 μ divisée par 10 (13).

Les résultats du comptage représentés sur la figure 90 illustrent cette constatation.

Enfin, l'ensemble du procédé, en particulier du fait du dégazage sous vide, évite d'avoir recours au système de refroidissement contrôlé (cooling control) pratiqué aux États-Unis sur les rails à haut carbone pour éviter toute inclusion de flocons d'H : ces rails sont maintenus en fosse pendant une dizaine d'heures pour que la température tombe de 750 à 300 degrés environ

— Pourcentage d'H (fig. 89).

Le dégazage par le vide est industriellement préférable au refroidissement lent des blooms qui est encore pratiqué à la seule con-

---

(13) Le comptage peut s'opérer en laboratoire à l'aide de faisceaux ultrasonores focalisés sous cuve à eau dans la zone à analyser.

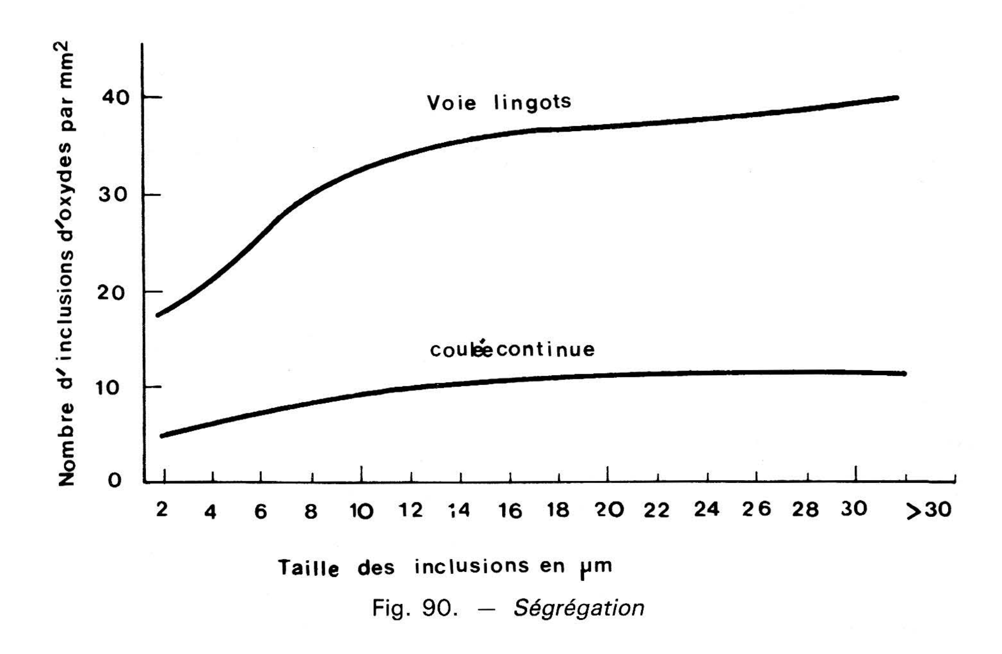


Fig. 90. — *Ségrégation*

dition qu'aucune introduction d'H ne puisse se produire après dégazage.

Les ajustages conçus pour protéger l'acier liquide de l'atmosphère permettent aux blooms de coulée continue de profiter pleinement de dégazage par le vide.

— Structure dendritique

Le contrôle de la température de coulée à l'intérieur d'une fourchette de 15 degrés au-dessus de la température de liquidus de l'acier permet d'obtenir une structure dendritique plus fine, donc une meilleure résistance aux fissurations.

— Ségrégation (fig. 90)

Le processus de ségrégation est lui aussi lié à la maîtrise des températures.

Contrairement au type de ségrégation en lingots, les blooms de coulée continue offrent une distribution très constante de la ségrégation du début à la fin de la ligne de coulée. Ces ségrégations sont de ce fait en moyenne nettement plus fines. En outre, les

propriétés mécaniques sont invariables tout le long des rails et, par conséquent, le comportement en voie est meilleur.

— Qualité de surface

Le procédé présente une remarquable amélioration de la qualité de surface par rapport au procédé par lingots. Or, un bon état de surface est très favorable à la durée de vie du rail.

— Isotropie des propriétés mécaniques

Par suite de l'amélioration de la propreté, les propriétés mécaniques transversales sont bien plus proches des propriétés longitudinales que dans le procédé lingots. L'homogénéité et l'isotropie du matériau sont de nature à différer l'apparition des fissures de fatigue et du shelling.

Le facteur d'intensité de contrainte paraît également plus élevé dans l'acier élaboré par coulée continue que dans l'acier coulé en lingots.

7.3. Laminage

Le laminage comporte deux phases : le blooming et le passage au train finisseur.

7.3.1. Le blooming

Il consiste, en partant du lingot dont la température a été homogénéisée dans des fours PITS à 1 200 degrés environ ou maintenant dans un four à longerons à marche automatique, à réaliser la ''prise de fer'' parallélépipède de 260 mm × 165 mm environ, destiné au train finisseur. Dans la fabrication des rails, cette opération est caractérisée par le grand nombre des passes et par conséquent la faible pression appliquée au cours de chaque passe. Il importe en effet, au cours de cette opération d'opérer un corroyage suffisant qui, par une succession de déformations lentes, améliore la qualité générale du produit. Toutes les deux passes, on fait tourner le lingot de 90 degrés autour de son axe, afin d'obtenir un corroyage uniforme (rapport de la section du bloom à celle du rail) de toutes les faces.

Dans le cas de la coulée continue, le blooming n'est pas indispensable, mais son emploi ne nuit pas, d'autant plus que pour obtenir un

corroyage suffisant, il faut utiliser des lingotières de la plus grande section possible, une section de 255 × 320 mm étant un minimum suffisant pour les rails UIC 60.

7.3.2. *Le passage au train finisseur*

La figure 91 représente le tracé de principe des cannelures successives dans lesquelles passe le bloom issu du dégrossissage, qui sont conformes au procédé BARTSCHERER avec cannelure fendeuse dont le but est le suivant : lors de la cristallisation dans la lingotière, il se forme des dendrites perpendiculaires à la surface du lingot. Si ces dendrites subsistaient perpendiculairement à la face du patin du rail, elles pourraient constituer des amorces de fissure à l'origine d'une avarie grave appelée "fente au patin" indécelable sur un rail en voie du fait de sa position. La cannelure fendeuse du patin écrase ces dendrites et les rend parallèles à la surface du patin en éliminant ainsi tout risque de fente ultérieure. Au total, de 18 à 20 passes sont nécessaires au blooming et de 9 à 11 au laminage.

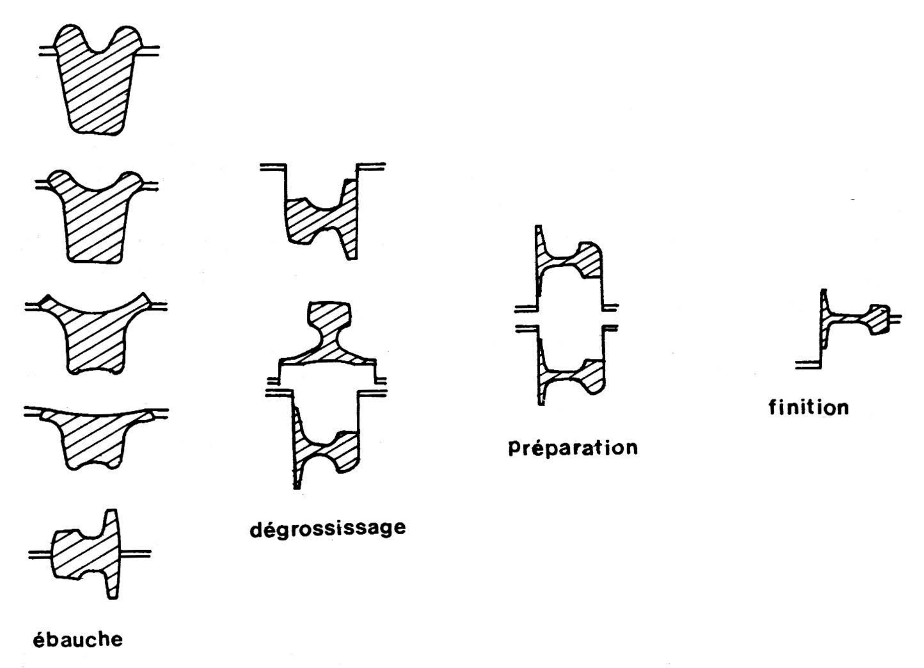


Fig. 91. — *Cannelures de laminage*

Le schéma complet de l'opération de laminage des rails est donné par la figure 92.

7.3.3. Laminage des rails en cage universelle

7.3.3.1. STAMMBACH, alors ingérieur en chef à la société WENDEL-SIDELOR, a imaginé vers 1964, d'employer le train à poutrelles d'HAYANCE pour la fabrication des rails afin d'en améliorer le corroyage ; dans cette méthode de travail, le rail est formé non plus entre des cylindres, mais entre des galets (fig. 93 et 94). Après être passé dans les deux cages dégrossisseuses d'un train classique à cannelures qui donne une ébauche symétrique, le bloom passe dans une première cage double dite "universelle" comprenant un premier ensemble de quatre galets dont les axes situés dans un même plan sont deux à deux perpendiculaires, ce qui permet de préformer l'âme, le patin et le champignon ; l'ébauche passe ensuite dans un second jeu de galets pour forger transversalement le champignon et le patin puis revient dans la seconde partie de la cage dont le jeu des galets approche les cotes du rail. Ce travail de pétrissage du métal se poursuit dans une seconde cage universelle et le rail reçoit ses cotes définitives dans une cage finisseuse.

7.3.3.2. L'avantage principal de la cage universelle est d'obtenir un meilleur forgeage de la surface de roulement et du patin, de sorte que la structure dendritique résiduelle soit aussi faible que possible et que, par conséquent, le procédé augmente la résistance à l'apparition de défauts de fatigue. Les tolérances de fabrication sont également plus étroites : écarts-types des principales dimensions comprises entre 0,15 et 0,25 mm contre 0,30 à 0,40 pour le procédé classique ; la soudure du rail est ainsi rendue plus précise. La figure 95 illustre la précision obtenue par Unimetal. Enfin, l'usure plus faible des rouleaux et la possibilité de chemisages diminuent sensiblement le prix de revient du laminage : la consommation de métal du cylindre (moins d'un kg par tonne de rail) est trois fois plus faible que par laminage conventionnel.

7.3.4. Chutage et sciage

Aux États-Unis, les rails sont en général élaborés en longueurs de 10 à 12 m (la longueur standard étant de 39 pieds à 60 degrés F,

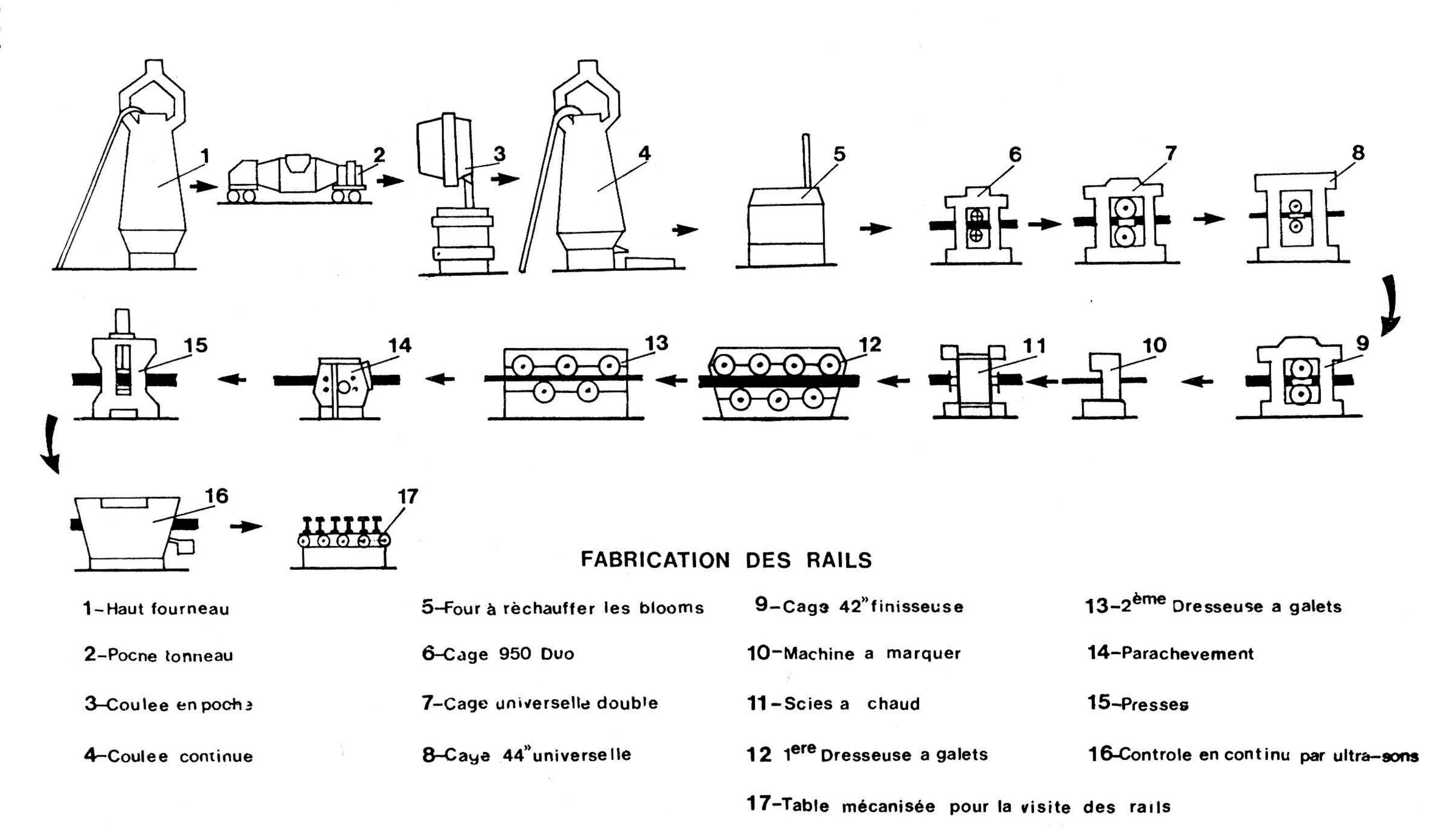


Fig. 92. — *Schéma de laminage*

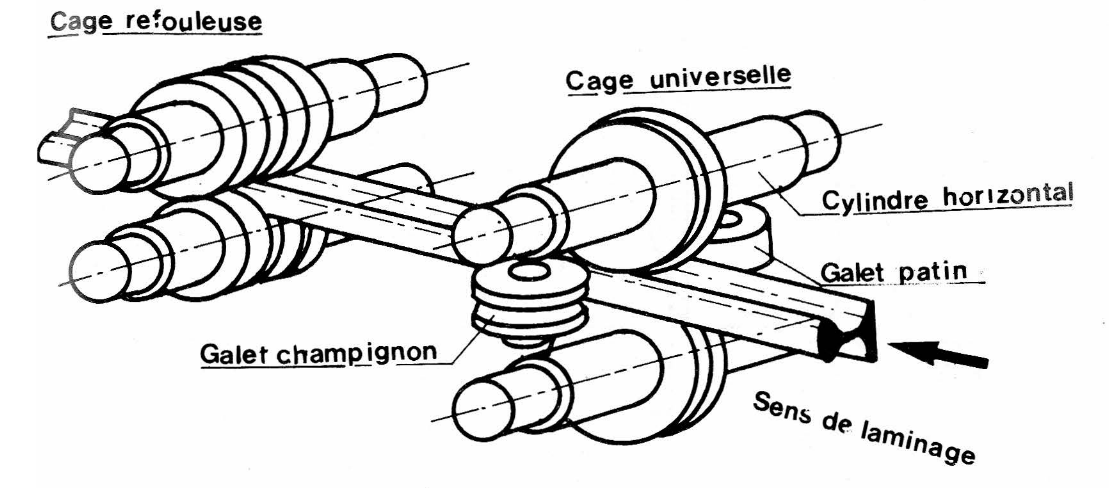


Fig. 93. — *Laminage par cage universelle*

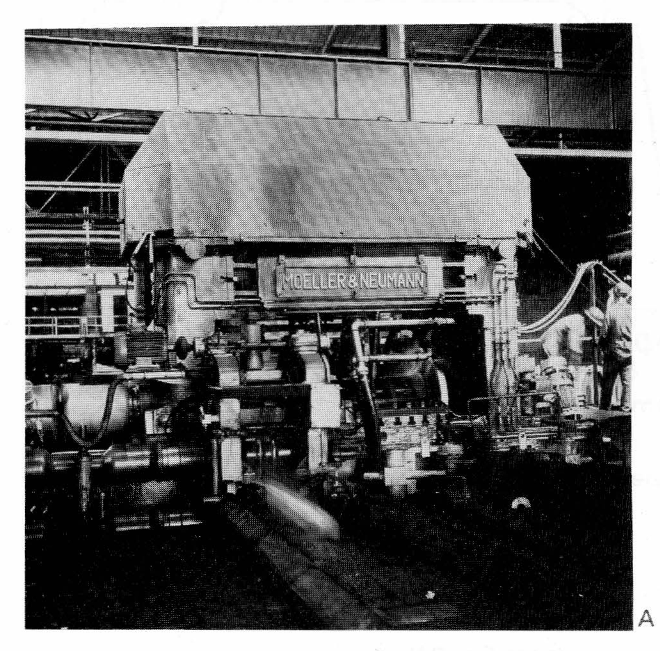
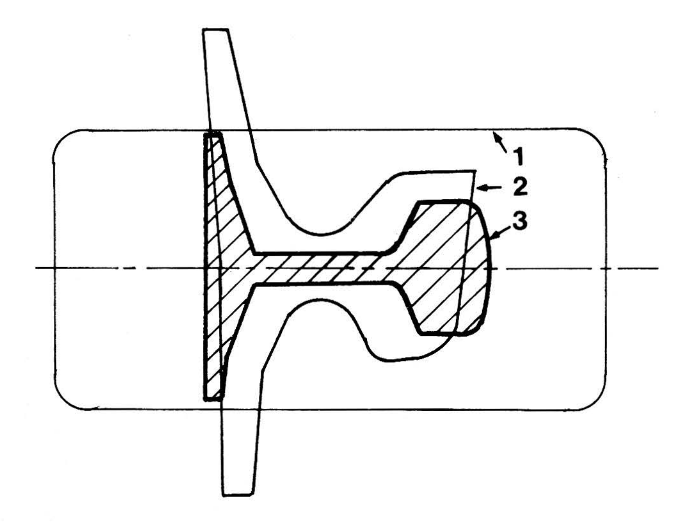
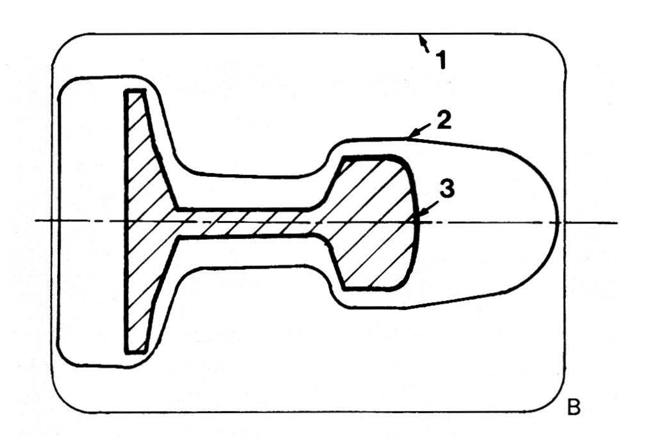


Fig. 94 A/B. — *Laminage par cage universelle*

Prócede classique



Procede sur cage universelle



1 - Prise de fer

2 - Ebauche

3 - Profil fini

(suite Fig. 94)

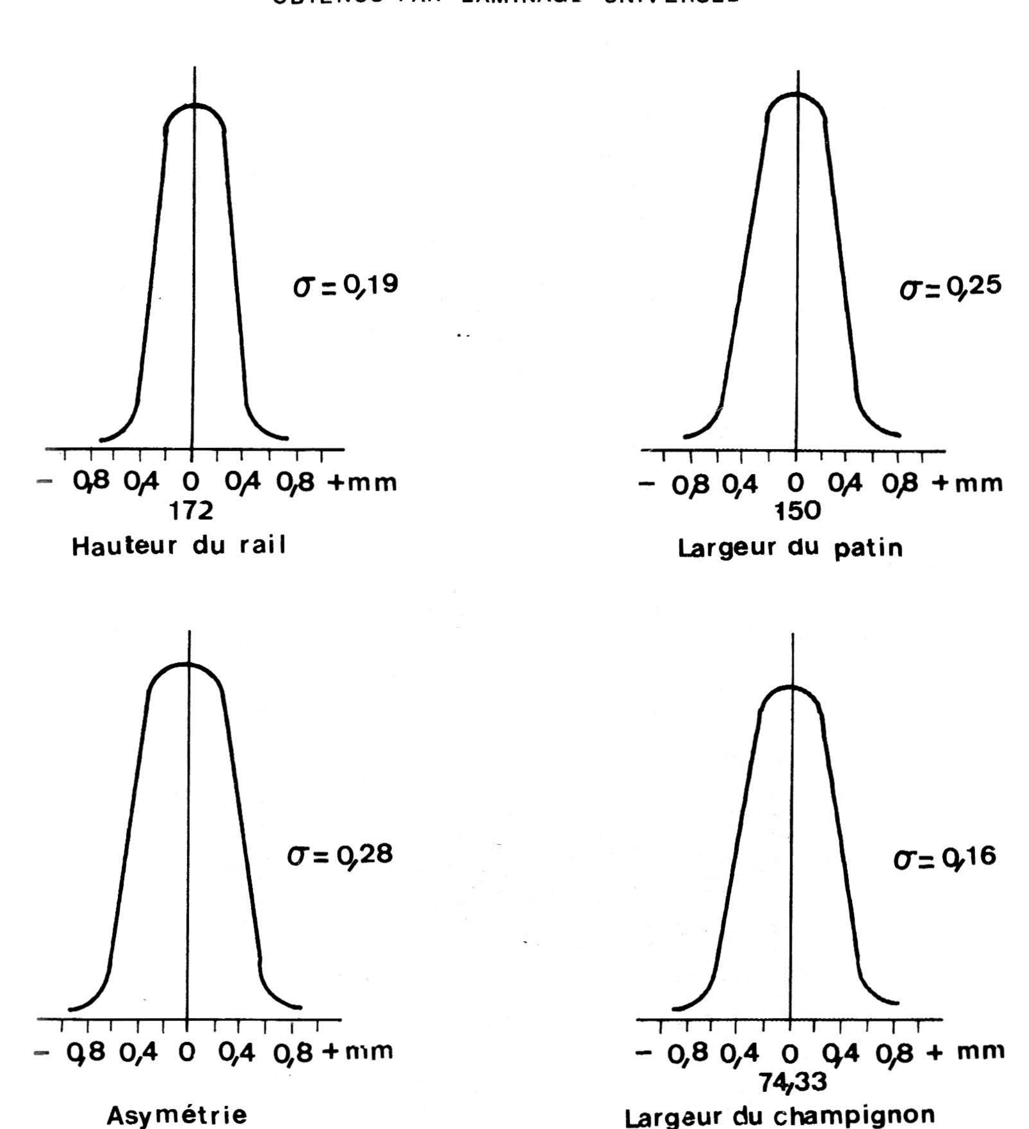


Fig. 95. — *Précision du laminage UNIMETAL par cage universelle*

soit 11,895 m à 15 degrés C). Cette longueur est limitée par les grils de refroidissement et les fosses de refroidissement contrôlé. La tendance en Europe est de plus en plus de fabriquer des rails de 25 ou 36 m ; on limite ainsi le nombre des soudures à exécuter pour les LRS et on réduit les défauts pouvant provenir d'un dressage défectueux des abouts. On peut envisager dans un avenir à moyen terme l'élaboration directe de longueurs de 72 m dans la mesure où les grils de refroidissement seraient aménagés en conséquence ; il en résulterait une amélioration de la qualité de la voie.

Le rail actuellement obtenu à Unimetal à partir du laminage du lingot ou du bloom de coulée est d'une seule longueur multiple de 36 m (2 × 36 m ou 3 × 36 m) majorée d'une surlongueur destinée à l'affranchissement des extrémités appelées tête ou pied et aux prélèvements nécessaires à la réception. La barre laminée est tronçonnée approximativement, à chaud, à l'aide de scies circulaires.

7.4. Marque des rails

Pour permettre l'identification des rails et le rapprochement des avaries auxquelles ils pourraient donner lieu en service avec les essais qui ont précédé la réception du lot, chaque rail porte sur une face de l'âme des marques en relief caractéristiques. Ces marques viennent de laminage et sont reproduites à chaque tour de cylindre. Les indications portées sont actuellement les suivantes :

- la marque du producteur,
- les deux derniers chiffres du millésime de l'année de fabrication,
- le mois de fabrication, en chiffres romains,
- les lettres ou chiffres caractérisant le type de rail,
- le symbole du procédé d'élaboration.

  T = THOMAS   ⊏ = électrique

  ⊓ = MARTIN   □ = oxygène

- le symbole de la nuance d'acier ; des deux variantes possibles, la SNCF a adopté la suivante :
- qualité ordinaire : pas de symbole

— qualité naturellement dure {A : ═══
— aciers spéciaux ═══ {B : ═══
— une flèche dirigée vers l'extrémité du rail correspondant à la tête du lingot

Exemple :

← HAYANCE 79 VI UIC 60 □ ═══

pour un rail en acier de nuance 90 B provenant de l'usine HAYANCE (société Unimetal) de profil UIC 60 fabriqué en juin 1979, élaboré dans un convertisseur avec soufflage à l'oxygène, la tête du lingot étant dirigée vers la gauche.

Enfin, un marquage spécial est opéré sur l'âme à l'aide d'un poinçon à chaud pour permettre d'identifier individuellement chaque rail. On désigne par A, B, C, ... Z, les barres. A la barre de tête, Z la barre de pied et on ajoute le numéro du lingot et de la coulée, par exemple 738 A 3.

Les mêmes principes se retrouvent en coulée continue, afin de permettre l'identification du rail dans le bloom, du bloom dans la veine et de la veine dans la coulée.

Les rails fabriqués aux USA (spécification AREA) portent des marques similaires. Par exemple, l'inscription

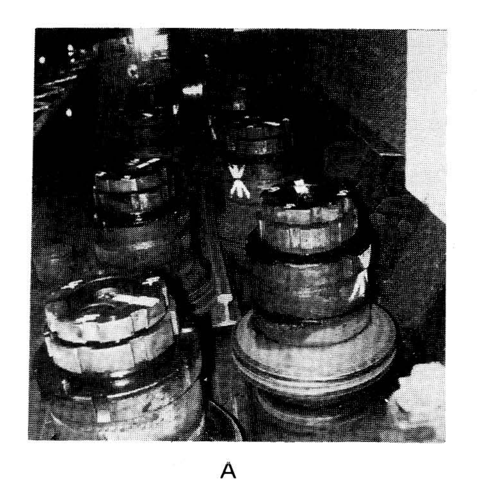
132 RE CC XYZ 1982 111

correspond à un rail de 132 livres par yard (66 kg/m) suivant spécifications AREA (RE) ayant subi un refroidissement contrôle (CC : cooling control) par l'aciérie XYZ, en mars 1982.

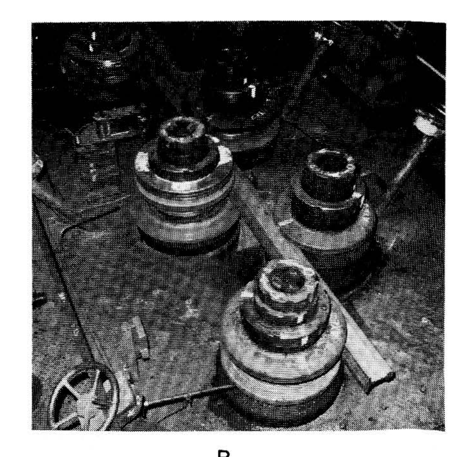
Sur la face opposée de l'âme, on marque en creux le numéro de coulée, avec référence au haut fourneau, la lettre de position du rail (de A à Z comme pour la SI 860), le numéro du lingot et éventuellement la méthode d'élimination de l'hydrogène (CC : refroidissement contrôlé, BC : refroidissement contrôle du bloom, VT : dégazage sous vide).

7.5. Préparation définitive des barres

7.5.1. Les barres sont ensuite dressées dans deux plans perpendiculaires, dans deux machines à rouleaux (fig. 96) qui, travaillant par



A



B

Fig. 96 A/B. — *Dresseuse à galets*

écrouissage du métal au moyen de flexions plastiques d'amplitude décroissante, ont l'inconvénient de créer dans le rail des tensions internes. La valeur du travail mécanique nécessaire pour exécuter le dressage donne une mesure des tensions créées au cours de cette opération que les fabricants de rails cherchent à réduire au minimum. Les extrémités sont dressées à la presse hydraulique. Pour circuler à grande vitesse, il convient d'attacher une particulière importance à la géométrie des rouleaux pour éviter les défauts de dressage sinusoïdaux, à l'origine des surcharges dynamiques aléatoires de résonance (1,70 à 1,90 de longueur d'onde correspondant à des galets de 55 à 60 cm de diamètre).

Dans le dressage des rails, il faut considérer trois notions :

- absence de cintre général, la flèche maximale admise étant de l'ordre de 150 mm pour une longueur de 36 m ;
- absence de jarrets aux extrémités ; ces défauts de linéarité occasionnés par l'introduction dans les dresseuses à galets doivent être effacés par redressage à la presse hydraulique. Dans le cas des rails destinés aux voies TGV, l'amplitude de la déformation d'about doit rester inférieure à 0,3 mm sur les trois derniers mètres des extrémités des rails ;
- absence d'ondulations périodiques dont l'origine se situe dans l'excentricité des galets des machines.

L'évaluation à l'œil du dressage étant insuffisante, Unimetal, en collaboration avec la SNCF, a mis au point un contrôle continu du dres-

sage de façon à détecter l'amplitude périodique de défauts sinusoïdaux supérieure à 0,3 mm sur 1,60 m de long.

L'appareil — l'ondulomètre — consiste en une poutre rigide supportée par deux roues et comportant 3 capteurs inductifs (fig. 97). Après

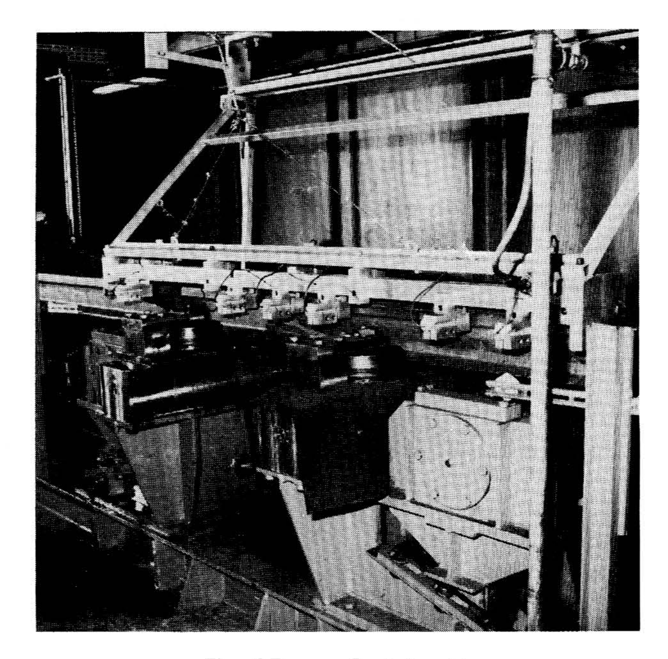


Fig. 97. — *Ondulomètre*

calibrage sur une règle droite, les signaux des capteurs sont traités électroniquement pour donner la différence entre le palpeur central et les extrêmes. Les enregistrements sont à la disposition du client. Pour améliorer la fonction de transfert de l'appareil, en particulier pour contrôler le dressage des abouts, l'usine d'Hayance va installer une nouvelle règle multipalpeurs.

Enfin, une installation expérimentale de contrôle du dressage par laser a été mis au point à l'usine de Villerupt. Le rayon envoyé sous incidence constante est réfléchi en fonction de la position du rail et vient impressionner une série de cellules permettant de définir la rectitude du rail et sa hauteur (fig. 98), la précision de la mesure étant de l'ordre de 15/1 000.

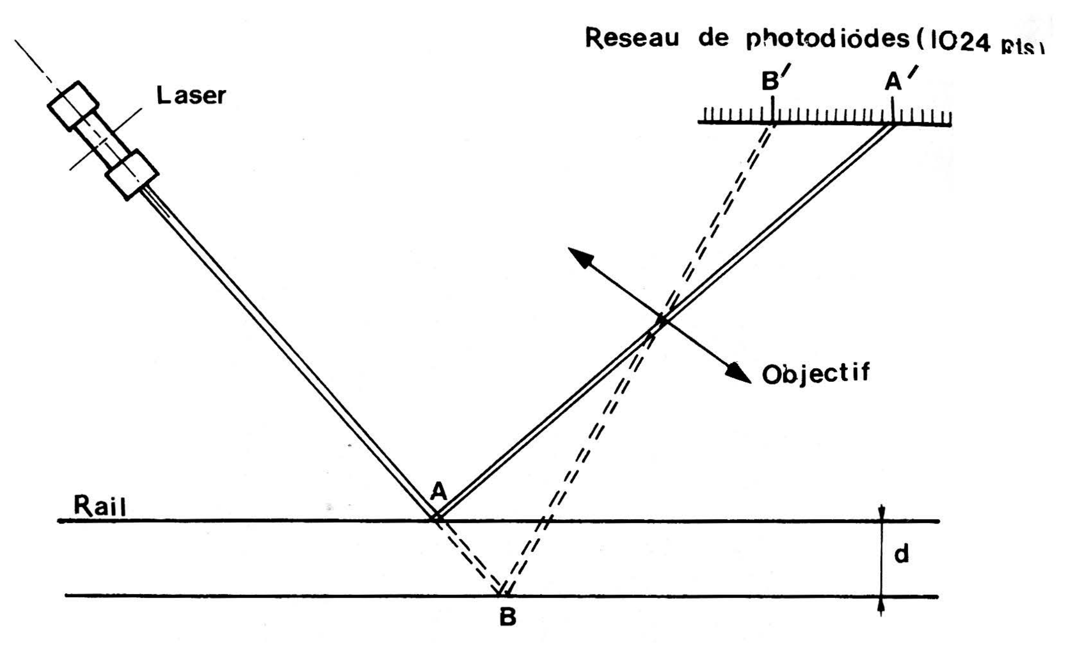


Fig. 98. — *Schéma de l'ondulomètre à laser*

Tous les rails TGV sont contrôlés et le résultat donne un bon feed-back pour le réglage des galets dresseurs et des presses.

7.5.2. Le rail est ensuite soumis à une série de contrôles, en particulier un contrôle ultrasonore qui sera abordé au chapitre suivant et un contrôle de surface aux courants de Foucault (14) qui remplace l'examen visuel tout au moins pour ce qui concerne les pailles et les criques.

7.5.3. Un traitement thermique éventuel peut être effectué soit dans la ligne de fabrication, soit en dehors : cette dernière solution, plus souple, surtout lorsque la quantité à traiter est relativement faible, apparaît préférable.

---

(14) Cet emploi des courants de Foucault fait l'objet d'une analyse dans le chapitre consacré au contrôle non destructif en voie.

7.5.4. Dressage par traction

La Société UNIMETAL a récemment breveté un système de dressage par traction qui supprime les inconvénients dus au dressage par galets et permet en outre la suppression quasi totale des contraintes résiduelles de dressage (fig. 29).

L'opération consiste à exercer aux deux extrémités d'un rail un effort de traction dépassant la limite d'élasticité du matériau (de l'ordre de 1 000 à 1 500 t pour les rails actuels), de sorte que les fibres, de longueurs initiales inégales, retrouvent une longueur égale à l'issue de l'opération.

La rectitude ainsi obtenue est exempte de toute discontinuité aux abouts et d'ondulations périodiques. Le produit satisfait donc aisément aux spécifications sévères des voies à grande vitesse, les écarts résiduels par rapport à la rectitude absolue se mesurent en 0,1 mm.

Le niveau de contraintes résiduelles est dix fois moindre que celui des rails dressés par galets.

Les essais de laboratoire effectués permettent de constater pour les rails dressés par traction :

— une longévité accrue
— une augmentation de la limite élastique : pour des rails UIC 90 A elle est augmentée de 70 MPa, l'allongement permanent du rail étant de 0,6 % ; le rapport de la limite élastique à 0,2 % d'allongement à la limite de rupture passant ainsi de 54 à 62 %. Pour des aciers alliés, l'augmentation atteint 90 MPa, d'où des limites d'élasticité de 740 et même 800 MPa ; à noter que cette augmentation équivaut à une addition de 0,7 % de Cr ou 1 % de Mn ou 0,12 % de V.

Au total on améliore les qualités mécaniques et géométriques du produit (très grande régularité de cotes le long du rail et absence d'ondulations). La suppression des contraintes internes est très favorable à la tenue du rail en voie, puisque nous avons vu le rôle néfaste qu'elles jouent dans la propagation des fissures de fatigue.

7.5.5. La mise à longueur exacte est faite à la scie en même temps que l'on procède, si nécessaire, au perçage des trous d'éclissage. Pour éviter de créer des amorces de fissures sur les bords des trous au

cours de cette opération, on utilise un outil double qui permet d'opérer en une seule phase et d'obtenir une surface finie lisse sur laquelle les grains sont coupés au lieu d'être arrachés. Ce procédé, joint à une réduction du diamètre des trous d'éclissage, réduit à néant les étoilures de trous d'éclissage (star cracks). Un stockage intermédiaire avant finition permet le dégagement quasi total de l'hydrogène.

ANNEXE 2

Soit une ligne de 500 km de longueur supportant un trafic quotidien de 100 000 tonnes assurée par 10 trains de 10 000 tonnes (100 wagons de 100 tonnes) chaque train étant remorqué par 3 locomotives diesel à 4 essieus. A raison d'une rotation en deux jours, locomotives et wagons parcoureront 500 km/jour, soit 150 000 km/an.

A raison d'un reprofiloage de roues pour 150 000 km parcourus pour les essieux moteurs et 300 000 km pour les wagons, on est amené à reprofiler chaque année, compte tenu des retours à vide 240 essieux moteurs et 4 000 essieux de wagons. Sur la base du coût en FF 1985, la dépense annuelle globale en résultant sera de

$$240 \times 8\,000 = 1\,920\,000$$
$$\text{et } 4\,000 \times 1\,500 = 6\,000\,000 \text{ FF}$$

soit une dépense annuelle globale de l'ordre de 8 MM FF.

Le trafic total conduit à un renouvellement de rails approximativement tous les 10 ans pour un montant (prix 1985 en FF), de l'ordre de

$$750\,000 \times 500 = 375 \text{ MM FF.}$$

La dépense rails étant 5 fois plus élevée que celle due au reprofilage, il y a donc lieu de limiter l'écart des duretés au strict minimum, ce qui semble d'ailleurs être le cas général. Ce calcul très sommaire ne prend certes pas en compte la totalité des éléments intéressés, mais il donne une orientation pour la solution de problèmes particuliers.

RÉSUMÉ DU CHAPITRE 4

L'acier est un alliage de fer et de carbone dont le diagramme fort complexe met essentiellement en évidence la ferrite qui est pratiquement de fer pur, un carbure de fer, la cémentite et un eutectique, la perlite dont la finesse joue un grand rôle dans les propriétés mécaniques de l'acier à rails dont la teneur en carbone varie en gros de 0,5 à 1 %. Le diagramme et par conséquent les propriétés de l'acier sont sensiblement modifiés par des éléments d'alliage, surtout le manganèse indispensable, mais aussi le chrome, le silicium et le vanadium qui améliorent la résistance, alors que la présence de métalloïdes, en particulier le soufre et le phosphore est à redouter ; les impuretés gazeuses et principalement l'hydrogène jouent un rôle néfaste en facilitant l'amorçage de fissurations dangereuses par leur développement.

L'acier subit d'importantes modifications de structures par traitement thermique ; la trempe entraîne la formation d'une structure hors d'équilibre, la martensite, dure mais fragile et contre laquelle il convient de se prémunir au cours des opérations de soudage. Par contre, un traitement thermique bien conduit permet d'obtenir des aciers à rails particulièrement résistants à l'usure. Pour la fabrication des cœurs d'appareils de voie, on a généralisé l'emploi de l'acier Hadfield à 13 % de manganèse dont la structure austénitique à froid est fortement durcie par l'écrouissage dû au roulement en donnant une excellente résistance aux chocs.

Les principales qualités demandées pour l'acier à rails, malheureusement souvent contradictoires, sont la limite élastique à 0,2 %, la limite

de rupture et la dureté, mais aussi la résilience qui caractérise la résistance aux chocs et la ténacité dont l'étude, dans le cadre de la mécanique de la rupture apporte d'intéressants développements sur la propagation des fissures en voie.

Les nuances d'acier à rails les plus couramment utilisées sont la nuance normale à 700 MPa de limite de rupture qui, sur les réseaux modernes, cède actuellement le pas aux aciers naturellement durs (900 MPa), nuances A & B de l'UIC et pour les rails résistants à l'usure (lourdes charges par essieu et courbes de faible rayon), les nuances extra-dures, traitées thermiquement ou aciers alliés en particulier au chrome-silicium et dont la résistance atteint 1100 et 1300 MPa.

Le rail est un produit noble de la sidérurgie dont la fabrication nécessite un grand luxe de précautions. Aux anciens procédés d'élaboration Martin & Thomas, s'est définitivement substitué le soufflage à l'oxygène dans des cornues de grande capacité où la maîtrise de la température et le contrôle de la réaction permettent un excellent ajustement de la composition du métal, affiné par un traitement en poche et un dégazage sous vide qui permettent d'abaisser le taux d'hydrogène et d'améliorer la finesse et la dispersion des inclusions non métalliques d'où résulte une diminution spectaculaire du nombre des fissurations internes en cours d'exploitation. Par ailleurs, la coulée continue, en cours de généralisation, apporte, outre un meilleur rendement de fabrication, une amélioration très bénéfique de la composition chimique, de la pureté et de la qualité de surface.

Le procédé de laminage par cage universelle d'Unimetal améliore le corroyage du rail et diminue les défauts de surface tandis que la substitution dans un proche avenir du dressage par traction au dressage traditionnel par machines à galets conduira à la disparition à peu près totale des contraintes internes, actuellement impossibles à maîtriser.

Enfin, la qualité de fabrication des rails est actuellement largement tributaire des procédés de contrôle non destructifs en usine en bout de fabrication, par ultrasons pour détecter les grosses inclusions et par courants de Foucault pour les défauts de surface.

5 CAHIERS DES CHARGES

1. Cahier des charges

1.1. Les rapports entre acheteurs et fabricants sont réglés, sur le plan technique par l'utilisation de cahiers des charges ou de spécifications techniques. Nous analyserons succinctement les deux plus répandues, l'UIC 860 (1) et l'AREA. Mentionnons aussi la norme britannique BS 11 dont la dernière édition est très voisine de l'UIC 860 et la norme ISO DP/5003, également rattachée à l'UIC, mais qui inclut malheureusement certaines prescriptions américaines, japonaises ou britanniques lui faisant ainsi perdre de son unité et donnant des latitudes beaucoup trop larges aux conventions possibles entre fournisseur et acheteur.

Les rails américains utilisés sur des réseaux où les charges par essieu sont nettement plus élevées qu'en Europe, sont plus durs et par conséquent plus fragiles. L'analyse chimique, l'essai de choc, l'élimination de l'hydrogène sont donc aux USA les caractéristiques les plus importantes, alors que le cahier UIC 860 met l'accent sur la résistance à la traction, l'allongement et l'aspect macrographique.

En fait, comme nous l'avons déjà évoqué, mieux vaut laisser au producteur la responsabilité de la composition chimique de son acier,

(1) La spécification UIC 860-0 a été mise en application en 1954 et révisée en 1963 et 1967.

ainsi d'ailleurs que des procédés et conditions de fabrication, sous réserve qu'il réponde aux caractéristiques mécaniques et à la propreté inclusionnaire imposées par le réseau acheteur. Si l'analyse chimique reste alors fondamentale pour le producteur dans son processus d'élaboration, elle n'est fournie à l'acheteur que comme simple renseignement.

Dans le contrôle AREA la propreté inclusionnaire est vérifiée essentiellement par le résultat des essais de choc et par un examen visuel de la surface de rupture d'un coupon. Outre son caractère aléatoire, ce mode de contrôle n'a pas la valeur du contrôle continu ultrasonore en usine qui donne une garantie pour l'ensemble de la production.

1.2. Dans le domaine du contrôle, il est souhaitable que les agents réceptionnaires du réseau acheteur puissent avoir libre accès à tous les stades de fabrication et travailler en étroite collaboration avec le producteur. Ils ont ainsi, après exécution des essais de réception, une meilleure vue d'ensemble de la qualité de la fabrication. C'est effectivement ce qui est prévu par la spécification UIC 860.

La tendance actuelle est à l'automatisation des procédures de réception. En particulier les opérations de contrôles dimensionnels et d'examen de la surface du rail sont longues, fastidieuses et par conséquent coûteuses à la fois pour le producteur et l'acheteur.

Les procédures de contrôle dimensionnel automatique et d'examens superficiels aux courants de FOUCAULT en cours d'essai permettront dans l'avenir de limiter la réception par le réseau à un simple contrôle par échantillonnage, suivant les lois statistiques avec bien entendu sanctions sévères en cas de constat de défauts.

1.3. La garantie, mentionnée dans le seul cahier UIC, est très sévère, pour le producteur. Elle prévoit en effet le remplacement à ses frais de tout rail affecté de défauts de fabrication, non décelés à la réception, dans les cinq années suivant la fabrication. Le producteur peut donc rester responsable d'un rail ayant supporté un trafic de 200 millions de tonnes.

1.4. Historique

C'est par la connaissance des avaries de rails et de leurs causes et l'évolution correspondante des Cahiers des Charges que l'on a pu agir sur la qualité et l'améliorer. Les rails sont actuellement fabriqués en France, comme dans de nombreux autres pays, suivant la "Fiche technique UIC 860" appliquée dès le 1er avril 1954 et révisée, depuis, périodiquement.

Les cahiers des charges fixent en particulier les essais de réception qu'il convient d'imposer aux rails. Il ne faut agir qu'avec une extrême prudence pour la modification de ces essais, car les incidences, souvent mal connues a priori, n'en sont que tardivement révélées par les conséquences en voie, heureuses ou fâcheuses.

En France, d'importants progrès ont été réalisés sous l'impulsion d'un organisme commun de recherches et d'études, créé sur demande du ministère français des travaux publics du 15.8.1925 à la suite de déraillements dus à des ruptures fragiles. Cet organisme, la Commission Mixte des Rails, regroupe des représentants de la sidérurgie et de la SNCF. Il a eu une part prépondérante dans tous les progrès réalisés depuis 60 ans dans le domaine du rail et est un bon exemple de coopération technique entre fournisseurs et clients. Cette collaboration s'est d'ailleurs poursuivie sur le plan international au sein du groupe de travail spécialisé "rail" de l'ORE, qui, entre autre choses, est à l'origine du Cahier 860.

Déjà en 1923, les anciens réseaux français avaient unifié leurs cahiers des charges en un document unique prévoyant trois nuances d'acier de 65, 70 et 80 kg/mm², mais qui a marqué un tournant dans les spécifications de réception.

En effet, les cahiers des charges des anciennes compagnies reposaient en grande partie sur l'analyse chimique. Au contraire, le cahier des charges de 1923, modifié en 1928 (introduction de la macrographie) qui a marqué un pas important dans l'amélioration de la qualité de l'acier à rail ne comportait aucune indication sur la teneur en certains métalloïdes (phosphore et soufre) qui rendent le métal fragile (2). En effet, dans la fabrication du rail, les analyses portent sur des dosages très faibles par rapport à des masses importantes de métal éla-

(2) Le 25 mars 1925, la rupture d'un rail en 21 morceaux a provoqué un déraillement grave en gare de Saint-Benoît (Vienne).

boré dont l'homogénéité est loin d'être réalisée, de sorte que l'analyse chimique n'a qu'une valeur très relative.

Nous avons vu en outre que la composition chimique d'un acier n'était pas la seule caractéristique pouvant influer sur les propriétés mécaniques. La préoccupation dominante du cahier des charges de 1923 était le risque de rupture fragile ; aussi avait-il mis l'accent sur les essais de choc et imposait-il un chutage de 12 % en tête des lingots pour éliminer retassure et ségrégation accusées. Il imposait aussi un corroyage minimal de 20 (rapport de la section du lingot à celle du rail). Le cahier des charges UIC a certes rendu une certaine importance à l'analyse chimique, le métal étant maintenant plus homogène et sa composition mieux contrôlée, mais en se contentant de fixer une fourchette libérale dans laquelle doivent se tenir les pourcentages des principaux éléments.

1.5. Nous analyserons maintenant les diverses conditions de réception.

1.5.1. Procédé de fabrication

Le producteur est libre du choix du procédé sous réserve d'en informer le client qui peut toutefois s'assurer des conditions dans lesquelles se fait l'élimination de l'hydrogène.

Les rails sont identifiés dans les conditions mentionnées dans le paragraphe fabrication, d'une part pour caractériser l'usine, l'année et le type de fabrication, d'autre part pour une immatriculation personnelle de chaque rail permettant ultérieurement d'en suivre la vie par une procédure informatisée.

L'absence de défauts internes est maintenant généralement garantie par une procédure de contrôle non destructif systématique (ultrasons) qui n'est pas toujours obligatoire, mais dont on ne saurait trop recommander l'application, car ce contrôle est un gage fondamental de qualité permettant, en outre, par accord entre fournisseur et réseau, une classification des rails en fonction du niveau de propreté inclusionnaire et de la fréquentation des voies.

Notons enfin que le BS II est le seul document imposant un minimum de corroyage : 25 pour les rails élaborés par voie lingots et 6 pour les rails élaborés par coulée continue.

1.5.2. Parachèvements

Les spécifications précisent les conditions dans lesquelles les rails doivent être dressés et sciés à longueur ainsi que les conditions de perçage des éventuels trous d'éclisses. Les cahiers AREA et BS II précisent les conditions de réception et le pourcentage admis de rails courts. Souvent, ces conditions sont fixées de convention expresse entre acheteur et fournisseur.

Le cahier AREA précise enfin les conditions de classement des rails, d'après l'état de surface. Nous avons déjà précisé l'intérêt d'un classement basé sur le contrôle non destructif de la propreté interne, les conditions en étant là encore de convention expresse entre réseau et usine.

1.6. Tolérances

Les tolérances UIC sont données dans le tableau 18. Les tolérances de dressage sont en général fixées en accord avec le réseau, la SNCF admettant par exemple dans le plan vertical une flèche de 0,7 mm sur base de 1,50 m, mais une flèche de 0,3 mm seulement sur base de 3 m pour les lignes à vitesse élevée et en particulier pour le TGV ; cette dernière condition oblige le fournisseur à une meilleure précision des galets de dressage et à un éventuel complément de dressage à la presse.

Le poids métrique enfin ne doit pas être inférieur à plus de 2 % du poids normal. Les tolérances AREA sont les suivantes, exprimées en millièmes de pouces

	soit en mm
Hauteur : + 0.030 – 0,015	+ 0,76 – 0,38
Largeur du champignon : ± 0.030	± 0,76
Épaisseur d'âme : + 0.040 – 0.020	+ 1,02 – 0,51
Épaisseur du patin : ± 0.050	± 1,27.

Verticalement, la tolérance est de 3/4 de pouces sur 34 pieds de long (19 mm sur 11.895 mm) et de 0,025 pouces sur 3 pieds (0,66 mm sur 0,915 m). Horizontalement, la tolérance est de 0,03 pouces sur 3 pieds (0,76 mm et 0,915 m) et de 0,023 à 3/4 de pieds de l'extrémité (0,58 mm sur 0,228 m).

TOLÉRANCES

• Profil et abouts

	Dimensions en mm	Tolérances	Observations	
1 - Hauteur H du rail (1)	H < 165 165 ⩽ H < 180 180 ⩽ H < 190	+ 0,5 − 0,5 + 0,6 − 0,6 + 0,7 − 0,7	profil UIC 54 profil UIC 60 profil UIC 71	Un décalage de − 0,5 mm des fourchettes de tolérances est admis pour les valeurs en pleine barre
2 - Largeur L du patin (1)	L < 150 150 ⩽ L < 160 160 ⩽ L < 170	+ 1,0 − 1,00 + 1,0 − 1,1 + 1,2 − 1,3	profil UIC 54 profil UIC 60 profil UIC 71	- d° - (avec + 0,5 mm)
3 - Largeur nominale C du champignon (2)	C < 72 72 ⩽ C < 74 74 ⩽ C	+ 0,5 − 0,5 + 0,5 − 0,5 + 0,7 − 0,7	profil UIC 54 profil UIC 60 profil UIC 71	- d° - (avec + 0,1 mm)
4 - Asymétrie du profil (3)	L < 150 150 ⩽ L < 160 160 ⩽ L < 170	+ 1,2 − 1,2 + 1,5 − 1,5 + 1,7 − 1,7	profil UIC 54 profil UIC 60 profil UIC 71	(4)
5 - Épaisseur de l'âme (5)		+ 1,0 − 0,5	tous profils	
6 - Inclinaison des portées d'éclissage (par rapport à la portée d'éclissage théorique inclinée)		3,6 %	tous profils	
7 - Hauteur d'éclissage		même tolérance que H	tous profils	
8 - Équerrage des abouts — Dans l'axe du rail	H < 180 180 ⩽ H < 190	+ 0,6 − 0,6 + 0,7 − 0,7	profil UIC 54 et UIC 60 profil UIC 71	
8 - Équerrage des abouts — Parallèlement à la base du patin	L < 150 150 ⩽ L < 160 160 ⩽ L < 170	+ 0,5 − 0,5 + 0,6 − 0,6 + 0,7 − 0,7	profil UIC 54 profil UIC 60 profil UIC 71	
9 - Autres dimensions	comme H	même tolérance que H		

(1) Les tolérances des rails lourds du type UIC 71 sont données à titre provisoire. Elles ne seront définitivement fixées qu'après les premières fabrications de ces rails.
(2) Mesurée à 14 mm sous la surface de roulement, c'est-à-dire dans les zones de raccordement des congés de roulement et des faces latérales du champignon.
(3) Contrôlées à l'aide du gabarit UIC.
(4) Si un client le demande cette tolérance peut être réduite à ± 1,2 mm pour les rails de nuance normale.
(5) Mesurée au niveau de l'épaisseur minimale.

TABLEAU 18A

• **Longueur des barres**

— jusqu'à 18 m inclus	± 2 mm
— au-dessus de 18 jusqu'à 24 m inclus	± 3 mm
— au-dessus de 24 jusqu'à 36 m inclus pour voie éclissée	± 4 mm
— au-dessus de 24 jusqu'à 36 m inclus pour voie soudée	± 6 mm
— au-dessus de 36 m	à convenir

• **Diamètre des trous**

— pour trous ⩽ 30 mm : ± 0,5 mm
— pour trous > 30 mm : ± 0,7 mm

• **Centrage et position des trous en hauteur et en longueur**

— pour trous ⩽ 30 mm : ± 0,5 mm
— pour trous > 30 mm : ± 0,7 mm

TABLEAU 18B

Dans l'ensemble, ces tolérances sont un peu moins sévères que les tolérances européennes, surtout en dressage.

Les tolérances du BS II sont pratiquement les tolérances du cahier 860 UIC. Celles de la norme ISO sont très voisines de celles de l'UIC. Les dimensions sont appréciées au moyen de gabarits dont la figure 99 donne quelques exemplaires.

1.7. Essais de réception

1.7.1. Les essais de réception prescrits par les spécifications techniques cherchent avant tout à déceler la fragilité et les imperfections de fabrication du métal dont l'absence est essentielle pour la qualité mécanique du rail ; le contrôle ultrasonore en usine permet de son côté de limiter le rôle nocif des inclusions non métalliques. Les essais prescrits par le cahier 860 sont les suivants :

— essais de choc sur chutes de tête (un essai par lingot)

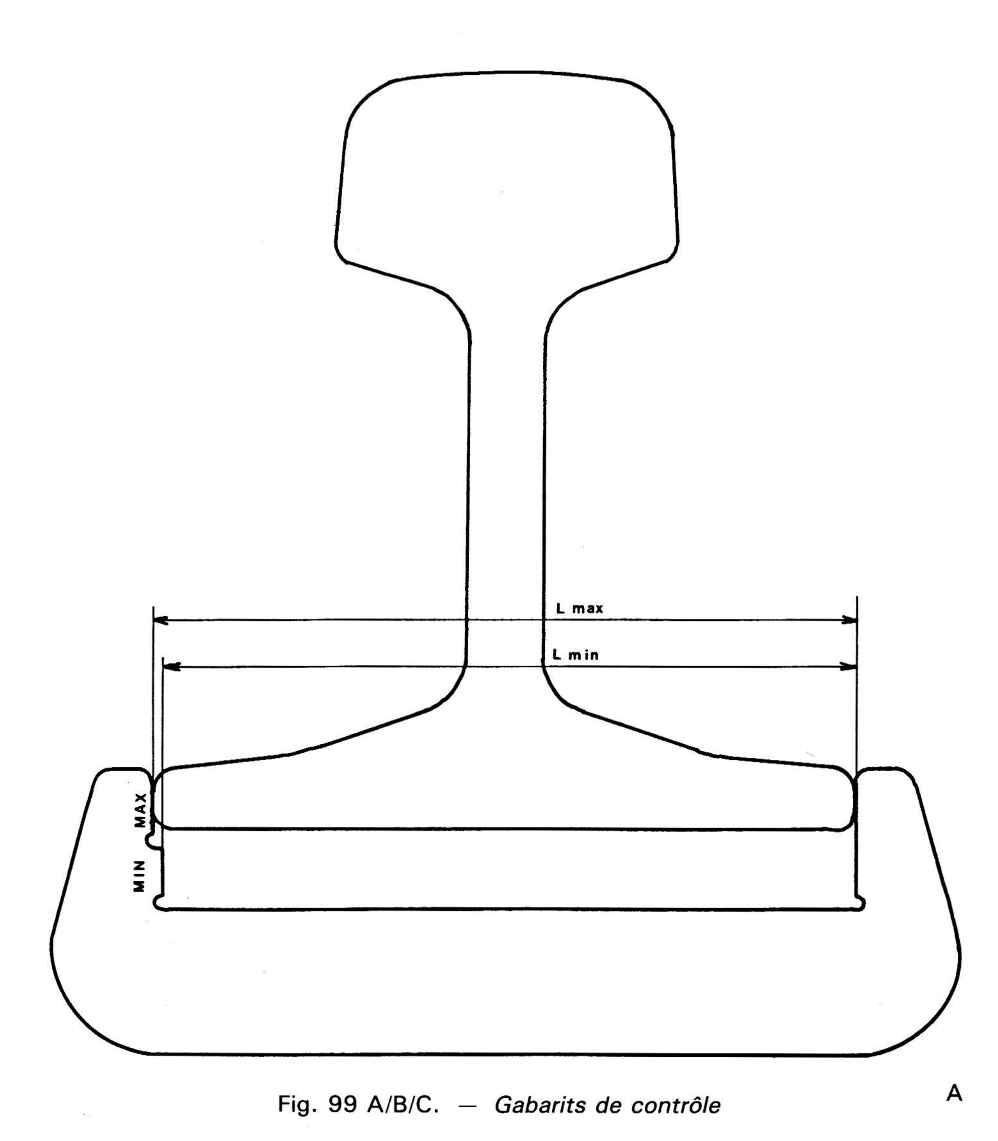
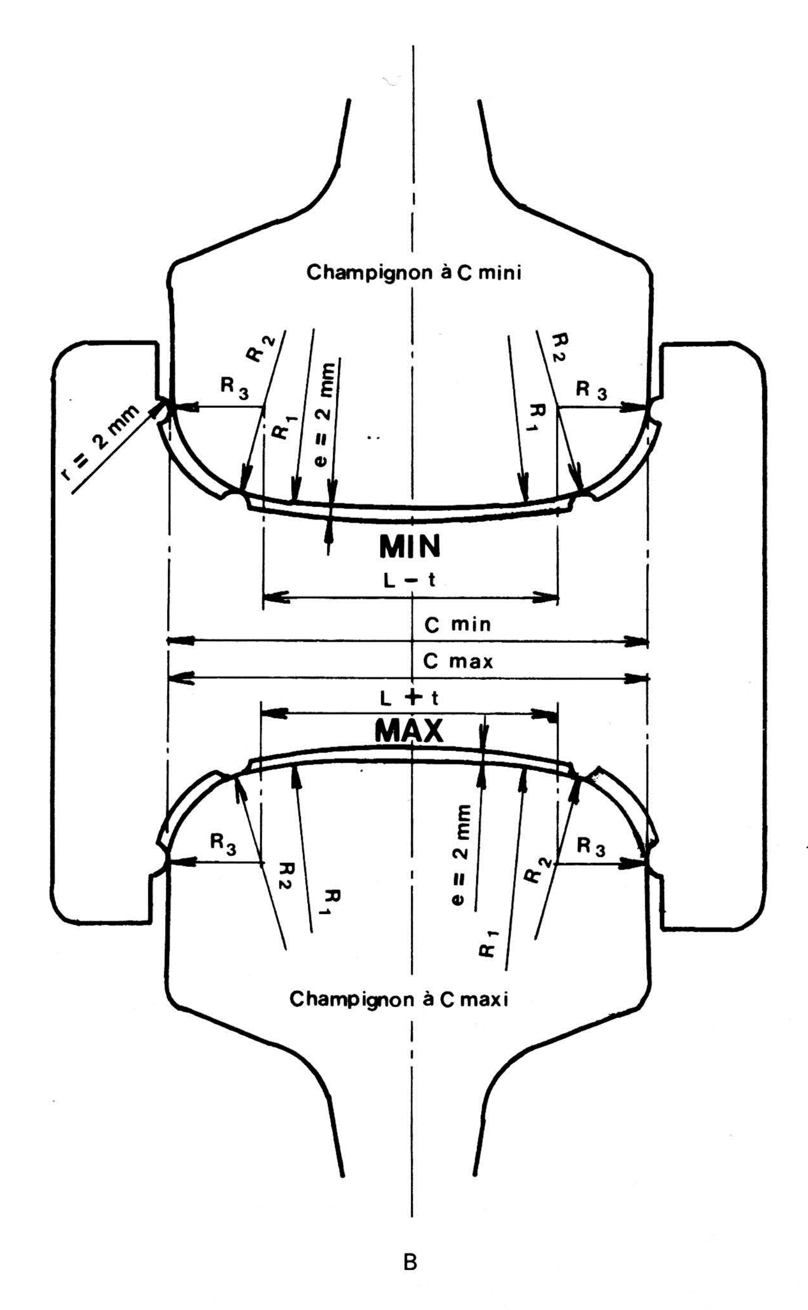


Fig. 99 A/B/C. — *Gabarits de contrôle*

— traction sur éprouvettes prélevées sur les chutes de pied (un essai par coulée) (3)
— macrographie sur des tranches prélevées dans les chutes de tête et de pied (un essai par coulée)

---

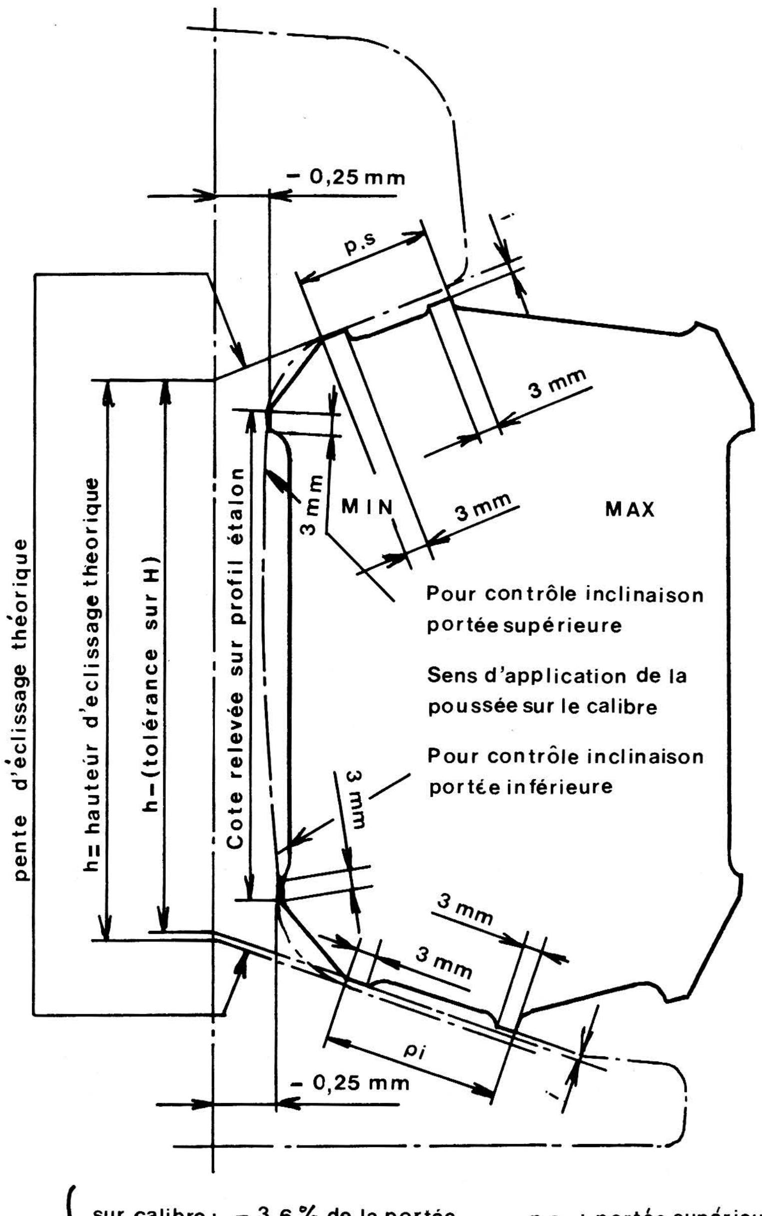
(3) L'unité de production est la coulée, quantité de métal obtenue en une opération élémentaire (25 t au convertisseur Thomas, de 100 à 500 t au four Martin, de 50 à 300 t au convertisseur à l'oxygène.



B

— dureté Brinell à titre indicatif, sur des tranches découpées dans les chutes de pied (un essai par coulée).

Le débitage des éprouvettes d'essais est fait suivant les indications de la figure 100. La spécification AREA, de son côté, prescrit une analyse chimique, un essai de choc et un examen de cassure.



i = { sur calibre : − 3,6 % de la portée d'éclissage théorique
sur rail à la jauge : de 0 à + 7,2 % de la portée d'éclissage théorique

p.s : portée supérieure d'éclissage théorique

pi : portée inférieure d'éclissage théorique (pour patin à une pente, se limiter à la valeur de p.s)

C

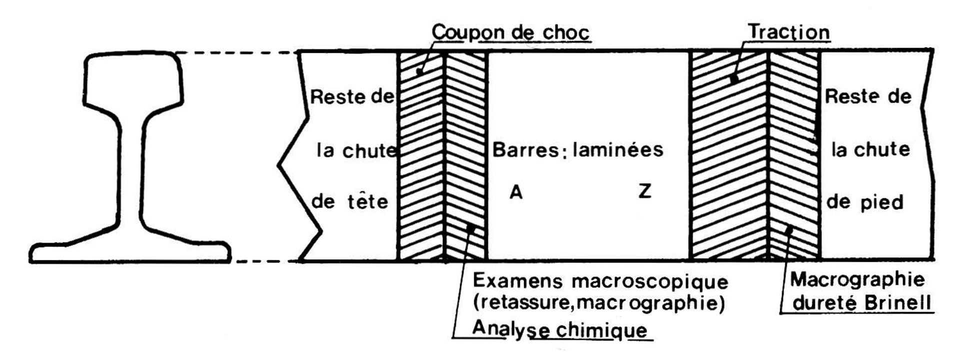


Fig. 100. — *Débitage des éprouvettes*

Le BS II s'apparente à l'UIC.

La norme ISO rend obligatoire l'analyse chimique et les essais de traction, éventuellement l'essai de dureté, et facultatif la macroscopie ou l'essai "nick and break" et l'essai de choc, ce qui, au total, n'est guère satisfaisant.

1.7.2. Analyse chimique

La composition chimique des aciers à rails UIC que le réseau peut vérifier sur demande, doit être comprise dans les limites fixées dans le tableau 19.

Qualité	Composition chimique (1)					Charge de rupture N/mm²	Allongement après rupture %
	C %	Mn %	Si %	P_{max} %	S_{max} %		
- Nuance 70	0,40-0,60	0,80-1,25	0,05-0,35	0,055	0,05	680-830	14 pour 5 d
- Nuance 90 A	0,60-0,80	0,80-1,30	0,10-0,50	0,05	0,05	880 min	10 pour 5 d
- Nuance 90 B	0,55-0,75	1,30-1,70	0,10-0,50	0,05	0,05		

(1) Par accord entre producteur et client, les fourchettes de valeurs fixées pour la composition chimique peuvent être légèrement modifiées afin de permettre d'obtenir les caractéristiques mécaniques minimales prescrites pour le profil commandé et en fonction du procédé de fabrication utilisé.

TABLEAU 19

La composition chimique des rails AREA est la suivante :

Élément	composition en % Rails de 90 à 114 l/y	Rail ⩾ 114 l/y	Tolérances en moins	Tolérances en plus
C	0,67/0,80	0,72/0,82	– 0,04	+ 0,04
Mn	0,70/1,00	0,80/1,10*	– 0,06	+ 0,06
P	⩽ 0,035	⩽ 0,035	–	+ 0,008
S	⩽ 0,037	⩽ 0,037		+ 0,003
Si	0,10/0,50	0,10/0,50	– 0,02	+ 0,02**

* Possibilité d'aller jusqu'à 1,25 %, mais alors on limite les additions à 0,25 % Ni, 0,25 % Cr et 0,10 % Mo.
** En coulée continue, on admet + 0,05

Les normes BS II sont voisines des normes UIC.

La norme ISO reprend les normes UIC en y incorporant de nouvelles nuances et en admettant une marge à la réception de 0,03 % pour C, 0,05 pour Mn et 0,01 pour S et Si (Tableau 20).

Qualité		Composition chimique (1) C %	Mn %	Si %	P max. %	S max. %	Caractéristiques mécaniques (2) R_m min. N/mm²	A %
1	A	0,50 à 0,70	0,60 à 1,00	0,07 à 0,35	0,05	0,05	680	10 pour 5*d*
	B	0,40 à 0,60	0,80 à 1,25	0,05 à 0,35	0,05	0,05		10 pour 5*d*
2	A	0,62 à 0,82	0,60 à 1,10	0,10 à 0,35	0,05	0,05	780	9 pour 5*d*
	B	0,50 à 0,70	0,95 à 1,25	0,10 à 0,35	0,05	0,05		12 pour 5*d*
3	A	0,60 à 0,80	0,80 à 1,30	0,10 à 0,50	0,05	0,05	880	8 pour 5*d*
	B	0,55 à 0,75	1,30 à 1,70	0,10 à 0,50	0,05	0,05		10 pour 5*d*

(1) Par accord entre producteur et client, les fourchettes de valeurs fixées pour la composition chimique peuvent être légèrement modifiées afin de permettre d'obtenir les caractéristiques mécaniques minimales prescrites pour le profil commandé et en fonction du procédé de fabrication utilisé.
(2) Se référer aux prescriptions ISO 82.

TABLEAU 20

Les rails alliés et traités thermiquement font l'objet de spécifications techniques particulières de la part des producteurs. Toutefois, le manuel AREA fait état des rails traités thermiquement par l'US Steel Co et la Bethleem Steel Co, mais se borne à décrire le traitement et

à faire état d'une dureté Brinell de 321/388 BHN. Les tableaux ci-dessus montrent en définitive que les rails standards américains s'apparentent aux rails naturellement durs de la S T UIC, mais nous avons vu que la tendance actuelle était d'utiliser systématiquement cette nuance, tout au moins sur les lignes à fort trafic ou à vitesse élevée.

1.7.3. Choc

Cet essai, le même dans la norme ISO, se pratique à l'aide d'un mouton guidé, d'un poids de 1 000 kg tombant sur un coupon de rail non entaillé, reposant par son patin sur deux appuis faisant corps avec une butée appelée chabotte dont le poids doit être au moins de 10 t (fig. 101), le massif de fondation supportant celle-ci ayant une rigidité suffisante pour éviter tout mouvement. Le coupon ne doit ni se rompre ni se fissurer sous un ou plusieurs chocs du mouton tombant d'une hauteur fonction du poids métrique du rail ; la flèche est relevée, à titre indicatif, après chaque essai. La hauteur H de chute en mètres est fixée par la formule 1000 H = 150 M, M étant la masse linéique du profil en kilos par mètre. La zone de tête est celle qui est à la fois proche de la ségrégation et la plus riche en carbone, donc a priori la plus sensible au choc.

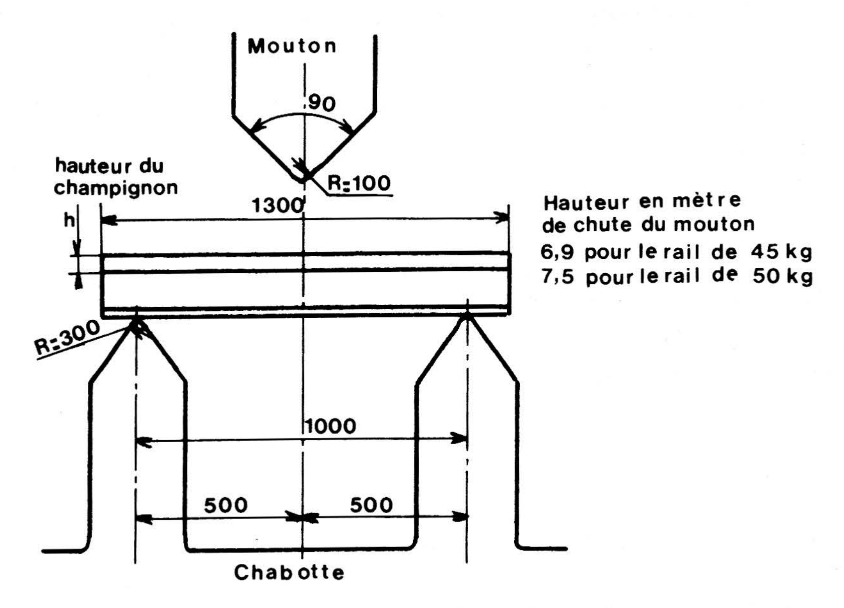


Fig. 101. — *Essai au coupon de choc*

Si un coupon de choc (procédé à la lingotière) donne un résultat non satisfaisant, on procède comme suit :

Trois contre-essais sont effectués l'un sur un coupon issu du même lingot et les deux autres dans deux autres lingots de la même coulée, qui n'ont pas été contrôlés. Si tous les contre-essais sont satisfaisants, le reste de la coulée est accepté dans sa totalité.

Si l'un des contre-essais ne donne pas satisfaction, on rebute sur chaque rail A de la coulée une longueur correspondant à 600 kg de métal sans que toutefois cette longueur puisse être supérieure à 12 m, et on procède à une deuxième série de 6 contre-essais. Si tous les contre-essais sont satisfaisants, le reste de la coulée est accepté.

Si un contre-essai ne donne pas satisfaction, le reste de la coulée est rebuté.

Des mesures analogues sont prises dans le cas de la coulée continue. L'essai de choc prévu par le Cahier des Charges français de 1923 était plus sévère, car il portait sur un coupon dont le champignon était entaillé à la fraise au milieu de son longueur sur les 2/5 de la hauteur. Pour l'essai, ce coupon était posé sur les appuis, champignon en-dessous, de façon à mettre en tension, sous le choc, la limite de la partie fraisée qui correspond à la zone du champignon où risque de se trouver le plus d'impuretés. Cet essai a été conservé pour les profils spéciaux tels que le profil d'aiguille pour appareil de voie.

L'essai de choc américain (drop test) portant sur une fabrication de rails durs est moins sévère car, outre des hauteurs de chute inférieures, il prévoit en particulier le choc sur chabotte montée sur ressort, ce qui diminue la force vive absorbée par le coupon d'essai.

La distance entre supports est de 3 pieds (0,91 m) jusqu'à un profil de 53 kg, 4 pieds (1,22 m) de 53 à 70 kg, 4'8'' (1,42 m) au-delà de 70 kg. Le mouton pèse 2 000 livres (900 kg) et la hauteur de chute est de 19 pieds (5,80 m) pour les rails de 45 à 50 kg, 20 pieds (6,1 m) de 51 à 60 kg et 22 pieds (6,71 m) au-delà. Pour un rail de 60 kg, la force vive est ainsi de 9 000 kg/m pour l'essai UIC et de 5 500 pour l'essai AREA, sans compter l'effet des ressorts. La norme ISO laisse en définitive la latitude de choisir. L'essai de choc AREA auquel les rails produits par coulée continue ne sont pas soumis est complété par un examen de la cassure d'une section de rail. Mais cet examen, répétons-le, ne saurait remplacer le contrôle ultrasonore qui cependant peut être réclamé par l'acheteur, suivant les spécifications

AREA (4). Les rails en provenance de coulée continue sont soumis à un examen macrographique. Les spécifications BS 11 correspondantes sont proches des normes UIC.

1.7.4. Traction

L'essai est fait sur une éprouvette découpée dans le champignon d'un rail prélevé dans la chute de pied. Cette zone, la moins chargée en carbone, est de ce fait, la moins résistante à la traction. L'axe de cette éprouvette est situé aux 2/5 supérieurs de la hauteur du champignon du rail (fig. 102). On relève pour chaque éprouvette

— la charge de rupture R

— l'allongement A après rupture.

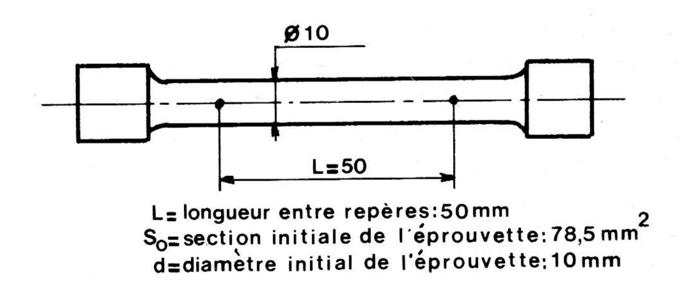


Fig. 102. — *Éprouvette de traction*

Pour les rails de qualité courante, la résistance à la traction R doit être comprise entre 680 et 830 N/mm² et pour les rails durs, supérieure à 880 N/mm², les allongements minimaux étant respectivement de 14 et 10 %.

La ST 860 détaille dans son article 2.7 les conditions de recette des essais et contre-essais éventuels.

Le BS 11 exige une résistance minimale de 710 N/mm² pour la nuance normale avec un allongement de 9 % et de 880 N/mm² avec allongement de 8 % pour les rails naturellement durs.

(4) L'obligation du contrôle est en cours d'introduction.

1.7.5. Macrographie

Le Cahier des Charges de 1923 ne comportait que des essais mécanique, mais on s'est rapidement rendu compte que si l'on éliminait ainsi les rails fragiles, on n'éliminait pas toujours ceux affectés de ségrégation, de retassure ou de structure fibreuse, en sorte que le nombre de rails avariés en service allait en augmentant. Pour remédier à cette lacune on a imposé, à partir de 1928, l'examen macrographique de tranches prélevées dans les chutes de tête et de pied. Cet examen, fort simple, consiste à relever une empreinte Baumann par application sur la tranche du rail d'un papier photographique préalablement imbibé d'une solution d'acide sulfurique à 3° Baumé. L'acide sulfurique transforme le soufre de l'acier en hydrogène sulfuré qui noircit le papier photographique (sulfure d'argent). L'examen de la face lissée de la tranche ne doit révéler aucune retassure et les empreintes obtenues ne doivent pas présenter de défauts plus marqués que ceux des images limites jointes à la Spécification (fig. 103) et dont la sévérité est très nettement augmentée depuis le 1er janvier 1968. Le cahier des charges a en outre été complété par des images spécifiques de la coulée continue. Ni la ST AREA, ni le BS 11 ne prévoient d'examens macrographiques. Cependant AREA et ISO prévoient l'essai "nick and break". Un coupon refroidi rapidement à partir de 600° est rompu et la cassure soumise à un examen visuel qui ne doit déceler ni repliure, ni retassure, ni cavité ou inclusion.

En fait, l'on peut dire que la macrostructure caractérise la qualité de la fabrication et la microstructure la propreté de l'acier, tout au moins dans la mesure où les impuretés peuvent être mises en évidence.

1.7.6. Dureté Brinell

Cet essai n'est fait qu'à titre de simple renseignement. Une ou deux empreintes sont effectuées à cet effet sur la tranche de chaque prélèvement macrographique.

La bille de 10 mm est appliquée pendant 15 secondes sous une charge de 294,20 N. La ST ne prévoit aucune norme. Les prescriptions ISO sont identiques. L'AREA prescrit des duretés Brinell de 248 pour les rails de 45 à 57 kg, 259 au-delà de 57 kg et 321/388 pour les rails à haute résistance.

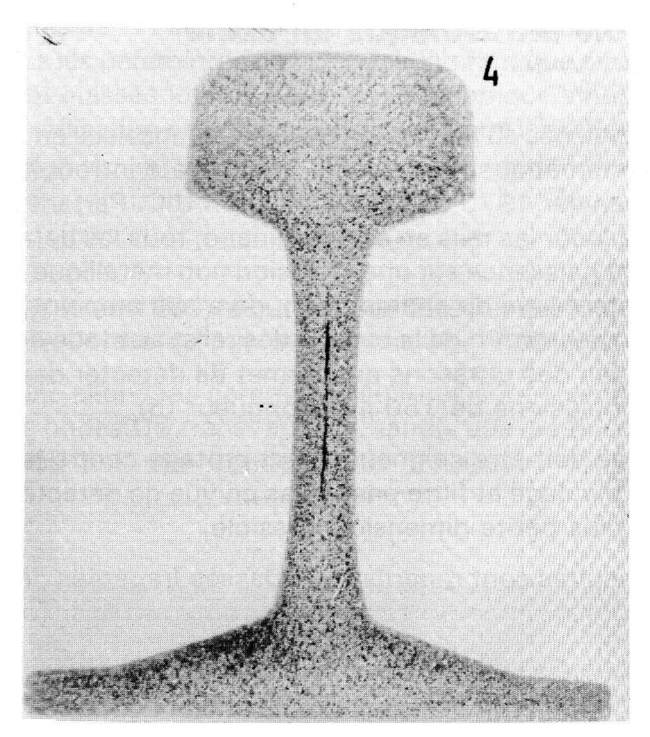


Fig. 103. — *Macrographies limites*

1.7.7. Hydrogène

Le cahier AREA impose un processus de déshydrogénation au cours de l'élaboration du rail. Il détaille les conditions du refroidissement contrôlé. Mais il admet aussi le refroidissement contrôlé des blooms et le dégazage par le vide.

La ST 860 n'impose pas de tels traitements : le contrôle non destructif permet de tester les résultats. Il n'en reste pas moins, nous l'avons vu dans la partie consacrée à l'élaboration du rail, que les procédés évoqués ci-dessus sont maintenant de pratique courante et que surtout en coulée continue, le taux d'H est suffisamment bas pour éviter toute fissuration ultérieure.

2. Contrôle ultrasonique en usine

2.1. Cet essai, mis au point dans les usines françaises en 1964-1965 et utilisé systématiquement depuis 1968, a été introduit dans l'édition du 1er janvier 1970 de la Spécification UIC. Partant de la constatation que, pour les rails en acier ordinaire, tous les défauts de fatigue prennent naissance sur une inclusion non métallique située dans une zone déterminée du champignon, on a mis au point un examen continu, non destructif, de la totalité des rails, au stade de la fabrication, au moyen des ultrasons qui permet de détecter des inclusions ou amas d'inclusions de 150 μ de longueur (5).

L'appareillage doit être soigneusement protégé contre les parasites à la fois par blindage et filtre passe-bas en vue de détecter des inclusions de la plus petite dimension possible.

Les rails auscultés sont répartis en 6 classes (repérées de 0 à 5) suivant le nombre et l'importance des échos enregistrés sur des défauts.

Les critères de classement ont été déterminés statistiquement par examen de rails déposés et jugés bons ou mauvais d'après leur comportement en voie.

L'observation continue en service de rails préalablement classés d'après des critères a ensuite permis d'en vérifier la validité et de montrer que le classement suivant ce procédé, appelé Ralus (RAIL-ULTRASONS) reflétait bien une propriété intrinsèque du rail (6).

Les rails considérés comme bons par le contrôle Ralus ont donc une haute probabilité de bons comportements en voie.

L'intérêt d'un tel procédé est double : d'une part, il permet d'éliminer, dès la fabrication, des rails dont on est sûr qu'ils seraient rapidement sujets à des défauts graves et par conséquent de diminuer les retraits en service ; d'autre part, il attire très rapidement l'attention du producteur sur les déréglages de fabrication qui, sans ce contrôle auraient pu durer beaucoup plus longtemps et il l'aide activement dans la mise au point de nouveaux modes de fabrication. Les

---

(5) Le principe d'emploi des ultrasons en contrôle non destructif du rail est explicité dans le chapitre VIII.

(6) 4 % de rails classés bons avaient eu un mauvais comportement et 84 % classés mauvais avaient eu un mauvais comportement.

progrès acquis dans l'élaboration de l'acier et la surveillance permanente de tous les paramètres de la fabrication font que plus de 99,7 % des rails sont classés lors du contrôle ultrasonique en usine comme aptes à leur utilisation en voies principales et que les rebuts sont donc négligeables.

2.2. A l'origine en 1969, le but était de détecter des inclusions d'une dimension de l'ordre du mm et de possibles inclusions d'H.

Les inclusions allongées comme les sulfures sont aisément détectables par des ondes US transversales, tandis que les flocons peuvent être détectés par une sonde située au-dessus du champignon (fig. 104).

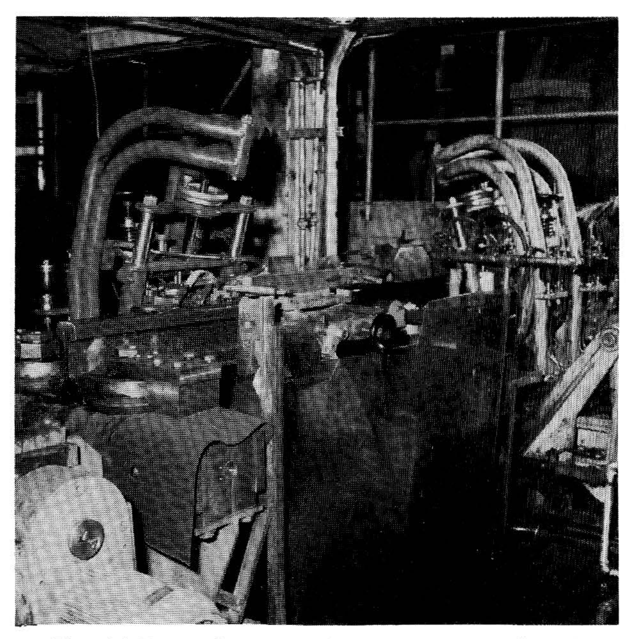


Fig. 104. — *Sondage ultra-sonore en usine*

La surface totale du champignon est donc auscultée par plusieurs sondes de côté et par une sonde verticale.

Afin de conserver une sensibilité constante quelque soit le profil du champignon à l'intérieur des tolérances de fabrication, on fait péné-

trer les faisceaux ultrasonores dans les rails par les faces planes des joues latérales dont les dimensions peuvent varier de 16 mm à 24 mm suivant les profils. Des calculs d'optimisation ont montré qu'un contrôle total était possible grâce à l'utilisation de 6 traducteurs plans à 5 MHz de 15 mm de diamètre (3 de chaque côté) à condition de faire varier les angles d'incidence suivant les types de rails (fig. 105). On utilise à cet effet 2 têtes à immersion locale, une de chaque côté, capables de suivre les variations de position du champignon au cours de son défilement et munies chacune de 3 traducteurs dont la position angulaire est fixée à l'aide de cales adaptées au profil.

Pour le contrôle du raccordement âme-patin (fig. 106) on utilise une tête à immersion locale pouvant suivre les déplacements de l'axe du rail au cours de son défilement, munie de deux traducteurs focalisés (∅ 15 mm - 5 MHz focale : 150 mm) qui sont montés dans un support pouvant tourner autour d'un axe vertical. Par rotation de ce support, on rend les faisceaux ultrasonores tangents au rayon de raccordement âme-patin, quelle que soit la largeur de l'âme qui peut varier de 12 mm à 22 mm.

Afin de contrôler les extrémités d'âme, à la demande de certains réseaux pour des problèmes de soudure, on utilise un dispositif de couplage par jet d'eau muni d'un traducteur focalisé (∅ 12,5 mm - 5 MHz).

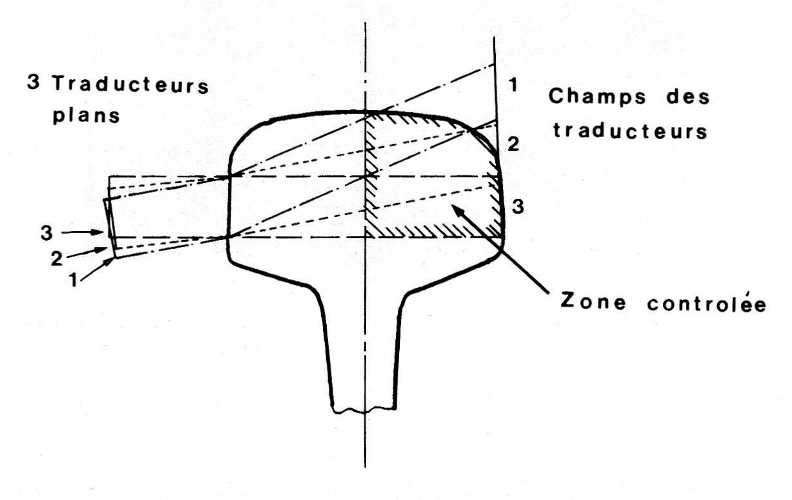


Fig. 105. — *Sondage US du champignon*

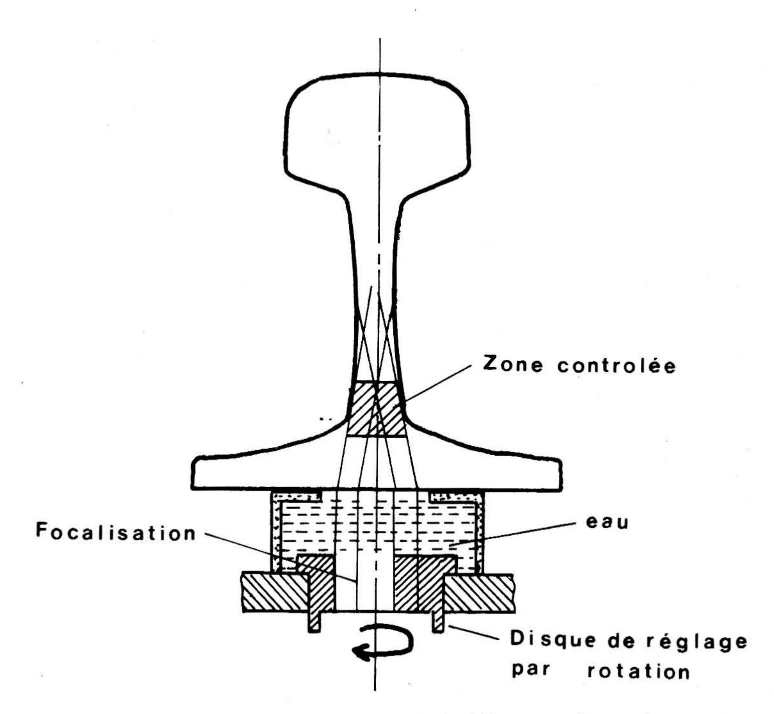


Fig. 106. — *Sondage US de l'âme et du patin*

Un dispositif de lecture au vol des numéros gravés à chaud sur l'âme, composé d'un flash, d'une caméra video et d'un video disque permet de figer les marques du rail sur un écran de télévision situé dans la cabine de l'opérateur.

2.3. L'appareillage ultrasonore qui permet de repérer des défauts de 200 à 300 μ fonctionne à la fréquence de récurrence de 11 KHz, chacun des 9 palpeurs de la machine travaillant successivement. Un mini-ordinateur commande les séquences de travail et exploite les résultats du sondage. Pour obtenir un indice de qualité, chaque rail est divisé en 5 zones (3 dans le champignon, 1 dans l'âme 1 dans le raccordement âme-patin) surveillées séparément. Un signal n'est pris en compte dans chacune de ces zones que s'il apparaît n fois consécutivement (n réglable) dans des tranches de 1 mm de longueur. Les signaux retenus sont alors comptabilisés en nombre total et en longueur cumulée suivant deux seuils, les résultats étant comparés à des critères préétablis, de façon à établir 3 classes de qualité : très

bon (0,1), bon (2,3), rebuté (4,5) (fig. 107). Une imprimante délivre un bordereau pour chaque rail et édite un état récapitulatif.

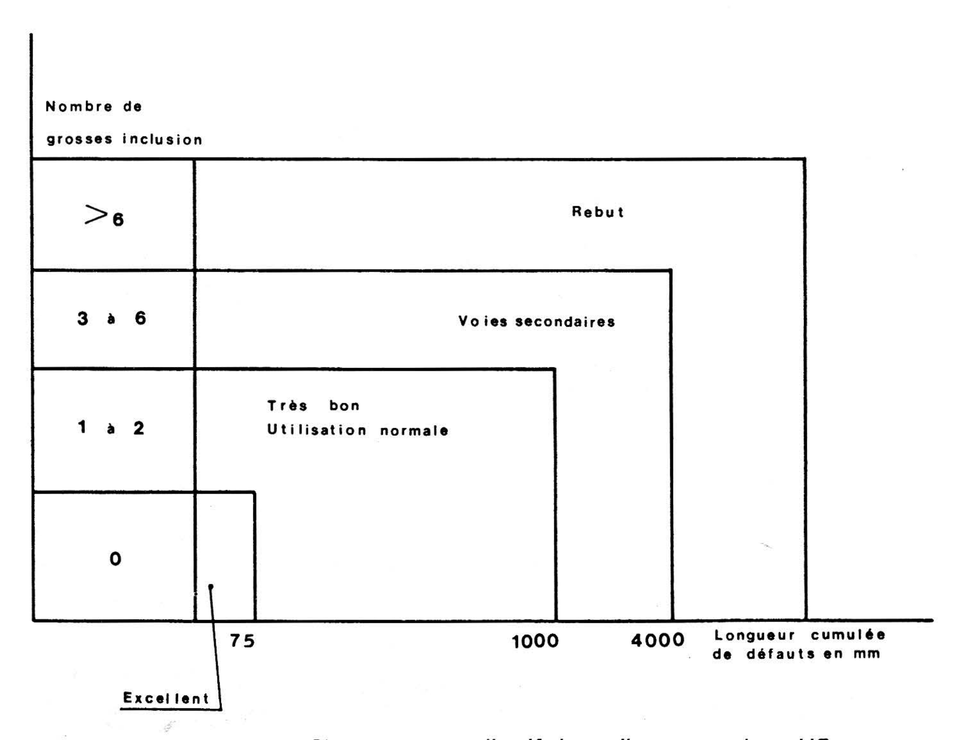


Fig. 107. — *Classement qualitatif des rails par sondage US*

La machine comporte en outre un enregistrement sur papier ainsi que l'archivage des signaux ultrasonores sous forme analogique, ainsi qu'un dispositif automatique de marquage à la peinture des classes de qualité sur les extrémités de rails.

Au total, c'est une zone de l'ordre de 30 à 35 mm de hauteur au-dessous de la surface de roulement du champignon qui doit être inspectée, c'est-à-dire la zone où les inclusions et les flocons d'hydrogène peuvent être à l'origine de fissurations dangereuses. Le système fonctionne de la façon suivante :

L'appareil doit pouvoir contrôler la totalité des profils produits par l'usine de 30 à 70 kg/m à la vitesse de 1,2 m/s (débit des dresseuses).

Il est nécessaire de contrôler les zones suivantes :

— totalité du champignon avec le maximum de sensibilité
— zone supérieure du raccordement âme-patin pour se garantir contre les amorces de fissurations transversales
— zone centrale de l'âme afin de détecter le creux éventuel pour satisfaire certaines demandes particulières.

Enfin, il est souhaitable que le classement en catégories de qualités se fasse automatiquement, compte tenu des demandes de la clientèle.

L'application de ce contrôle a permis de diviser par 15 le nombre de rails déposés par les réseaux en période de garantie (5 ans).

3. Réception en usine

3.1. La réception des rails commandés par un client est en principe effectuée directement en usine par ses soins. Les réseaux importants disposent chez leurs fournisseurs habituels d'une équipe de contrôleurs qui assurent la réception des commandes, mais qui suivent aussi les conditions de fabrication et sont ainsi bien au fait des problèmes correspondants. Ils peuvent ainsi jouer un rôle non négligeable dans l'amélioration de la qualité. Par ailleurs, les réseaux faibles consommateurs font très souvent appel à leurs collègues dotés de réceptionnaires en usine ; l'application systématique du Cahier des Charges UIC facilite bien entendu beaucoup cette pratique.

Jusqu'à une époque récente, la réception en usine était double comprenant l'auto-contrôle du fournisseur et la réception proprement dite par le client. Cette double recette repose sur l'examen de l'ensemble des tests de laboratoire prévus par les spécifications techniques et sur les résultats des divers contrôles automatisés de la chaîne de fabrication que nous avons précédemment énumérés ; mais elle comporte en outre un examen visuel des quatre faces du rail ayant pour but de détecter les défauts de surface dont certains sont d'ailleurs réparables sur place. Outre les manutentions lourdes qu'il entraîne, cet examen visuel est particulièrement fastidieux. D'autre part, l'expérience a prouvé qu'un double contrôle pouvait être relativement inefficace, chacun d'eux comptant sur l'autre pour la détection des anomalies. Ce fait, combiné au développement des automatismes de contrôle, conduit à une évolution qui se dessine actuellement vers un

renforcement du contrôle par le service qualité de l'usine sous la surveillance des agents réceptionnaires des réseaux et à un allègement corrélatif de la réception par le client.

3.2. La réception par le service qualité de l'usine comprend dans ces conditions deux aspects :

— la prise en compte des résultats de tous les examens de laboratoire prescrits par le cahier des charges, que nous avons décrits dans le présent chapitre et éventuellement de tout autre test ou essai que souhaiterait l'usine. A ces données, il faut ajouter les résultats de l'ensemble des contrôles automatiques pratiqués à l'extrémité de la chaîne de fabrication : sondage ultrasonore de la section du rail, détection des défauts de surface à l'aide des courants de Foucault (fig. 108) vérification du dressage des barres par l'ondulomètre,

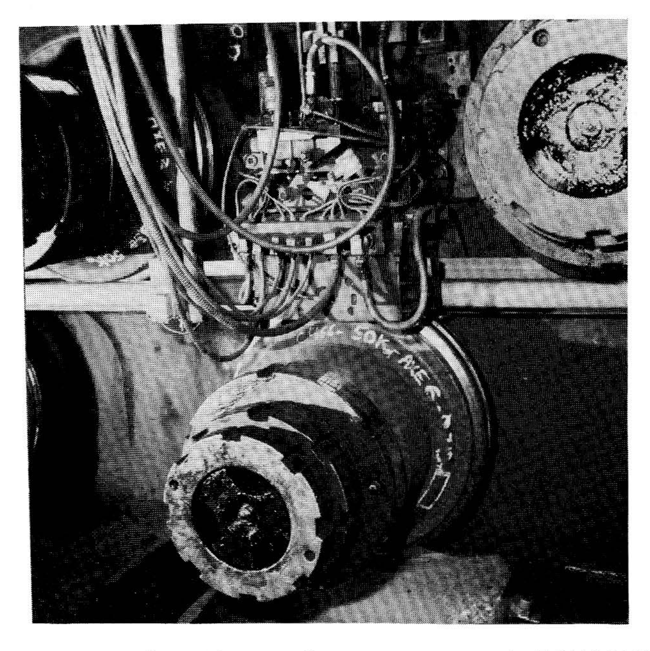


Fig. 108. — *Contrôle en usine aux courants de FOUCAULT*

— examen visuel sur les quatre faces, d'ailleurs allégé par la détection automatique des défauts de surface, vérification de la rectitude des abouts à l'aide d'une règle d'en principe 1,5 m de longueur, vérification des cotes transversales du profil avec des jauges et gabarits agréés par le réseau client. Cet examen est fait sous la surveillance des agents réceptionnaires, ce qui permet une prise de décision immédiate, d'un commun accord, à chaque découverte d'anomalie.

3.3. Le travail des réceptionnaires du réseau est alors sensiblement allégé et vraisemblablement plus efficace : il consiste essentiellement à vérifier que les consignes de contrôle agréées d'un commun accord sont bien appliquées et que les installations de mesures automatiques fonctionnent de façon satisfaisante. Ils vérifient les résultats des essais de laboratoire et des contrôles automatiques d'usine et enfin ils peuvent procéder par sondage à des vérifications visuelles et dimensionnelles. Toute dérive du contrôle par le service qualité de l'usine doit naturellement être impitoyablement sanctionné. En fait le rebut par les agents réceptionnaires est pratiquement nul.

Il est souhaitable en définitive que se développent les méthodes de réception automatisées qui se substituent progressivement aux réceptions par l'homme, ce qui doit aller dans le sens de la qualité et de la rapidité.

RÉSUMÉ DU CHAPITRE 5

La fabrication et la réception des rails en usine sont conditionnées par l'application de cahiers des charges de plus en plus standardisés et dont les plus répandus sont le 860 UIC et l'AREA américain. Ces cahiers ont progressivement évolué à l'occasion des constatations faites en voie et d'une concertation de plus en plus étroite entre fournisseurs et réseaux utilisateurs, matérialisée en France depuis une soixantaine d'années par la "Commission Mixte des Rails". Au fil des années, les exigences des cahiers ont évolué en fonction des défauts redoutés par les réseaux ; c'est ainsi que les réseaux américains, utilisateurs de rails durs et par conséquent relativement fragiles mettent l'accent sur l'essai de choc et insistent sur le dégazage de l'hydrogène.

Le cahier UIC laisse le producteur maître du procédé de fabrication et de la composition chimique, tout au moins dans certaines limites, mais outre les essais classiques de résistance à la rupture, d'allongement et de dureté, impose des macrographies limites permettant de s'assurer de l'élimination des impuretés au cours de la fabrication.

Au fur et à mesure de l'augmentation des performances exigées en voie, en particulier dans le domaine des grandes vitesses (TGV) les tolérances géométriques de fabrication deviennent de plus en plus sévères, particulièrement pour le dressage. Au double contrôle visuel et manuel des réceptionnaires de l'usine et du réseau acheteur a tendance actuellement à se substituer un unique contrôle usine supervisé par l'acheteur ; ce contrôle est facilité et amélioré par la généra-

lisation des procédés automatiques de réception : mesure du respect des tolérances géométriques, détection des défauts de surface aux courants de Foucault et enfin appréciation de la propreté interne de l'acier par contrôle non-destructif ultrasonore. Ce dernier permet en particulier un classement des rails sortis d'usine en fonction de leur propreté inclusionnaire et de la finesse de cette dernière et fournit à l'usine une possibilité d'action immédiate sur toute dérive de fabrication.

6 POSE DES RAILS

1. Rails courts

1.1. Joints

1.1.1. Qu'ils soient appuyés ou en porte-à-faux, les joints peuvent être

- ''concordants'' quand ils sont situés sur une même perpendiculaire à l'axe de la voie
- ''alternés'' s'ils ne répondent pas à cette condition ; dans ce cas, les joints d'une file de rails peuvent se trouver à peu près au droit du milieu de l'intervalle des joints de l'autre file ou présenter un décalage systématique.

Ce deuxième type de pose qui facilite en alignement le roulis des véhicules à essieux est intéressant en courbe de faible rayon, car il améliore le dressage en diminuant de moitié l'influence de la faible inertie transversale du joint. C'est pourquoi, dans les courbes de faible rayon des zones de LRS, la SNCF pose des rails de 36 m à joints décalés de 12 m avec une tolérance de ± 1,20 m par rapport à la valeur théorique afin d'éviter l'emploi de rails courts en courbe.

1.1.2. L'utilisation de rails de longueurs spéciales dans les courbes est inévitable dans la pose à joints concordants compte tenu de la différence de longueur des deux files de rails. Pour une courbe de développement d cette différence $d - d' = 2e\frac{d}{r}$ (2e étant l'écartement de la voie en mètres). La concordance absolue des joints basée sur cette formule conduirait à l'emploi sur la file intérieure de rails de toutes longueurs.

On a donc adopté une solution de compromis qui entraîne un décalage limité des joints dans les courbes. Il existe, pour chaque longueur normale, une série de longueurs courtes permettant, par une répartition judicieuse sur la file intérieure des décalages raisonnables (de l'ordre de 5 cm). Le tableau N° 21 indique les sous-longueurs des rails de 18, 24 et 36 m utilisées par la SNCF

Longueurs normales	Sous-longueurs $\Delta = 40$ mm	$\Delta = 100$ mm
36 m	35,96	35,90
24 m	23,96	—
18 m	17,96	17,90

TABLEAU 21

1.2. Travelage

Le chapitre 2 nous a montré l'intérêt d'un travelage serré : l'influence des charges de roues sur la plateforme est plus faible et se traduit par une meilleure tenue du nivellement de la voie. Le nombre de traverses au kilomètre, ou travelage de l'ordre de 1 000 il y a un siècle, a progressivement augmenté pour atteindre 1 666 en traverses béton sur la SNCF (distance de 0,60 m entre axes de deux traverses successives). En URSS ou aux États-Unis, où les charges par essieu sont plus élevées, on utilise des travelages compris entre 1 850 et 2 000 (entraxes de 0,55 et 0,50 m).

1.3. Éclissage

1.3.1. Nous n'insisterons pas sur l'éclissage qui n'intéresse qu'indirectement le rail et qui disparaît de plus en plus au bénéfice des longs rails soudés. Rappelons seulement que la faible inertie verticale de l'éclissage est à l'origine d'efforts et de défauts de nivellement importants aux extrémités des rails, conjugués avec des usures anormales (matages), le tout entraînant des frais importants de maintenance. Un serrage efficace des boulons d'éclisses peut limiter les dégâts, le desserrage étant sensiblement retardé par utilisation de rondelles Grower ; l'expérience a montré qu'une tension de 10 000 kg au serrage permet de disposer au bout d'un an d'une tension résiduelle supérieure à 2 500 kg, limite au-dessous de laquelle l'éclissage perd son efficacité. Le dispositif de rattrapage de jeu ainsi constitué est extrêmement simple, mais ses possibilités d'action sont épuisées lorsque les éclisses viennent au contact de l'âme du rail. Cette pénétration sera d'autant plus lente que l'inclinaison des portées d'éclissage sera plus forte ou que l'usure annuelle sera plus faible.

Les profils actuels ont une inclinaison voisine de 1/3 qui fait travailler l'éclissage d'une façon relativement favorable. Il en est de même aux USA.

Lors des opérations d'entretien, on compense l'usure réciproque des zones de contact par l'emploi de fourrures SHIM ou d'éclisses rematricées au profil d'usure.

1.3.2. L'éclisse doit permettre au rail de se dilater et de se contracter librement en fonction des variations de température. Le diamètre des trous d'éclissage dans le rail et dans l'éclisse et celui des boulons doivent être choisis de façon à permettre une libre dilatation.

Soit r le diamètre du trou du rail, e le diamètre du trou d'éclisse, a l'entraxe des trous centraux d'éclisses, b la distance entre l'about du rail et l'axe de son premier trou, d le diamètre du boulon et d' la distance bord à bord des trous. La figure 109 montre que, lorsqu'il y a contact entre deux rails, le passage du boulon entre trous d'éclisse et de rail impose l'inégalité

$$a - 2b \leqslant e + r - 2d$$

Le permissif (ouverture maximale du joint du au coincement du boulon) est $a + e + r - 2(d + b)$.

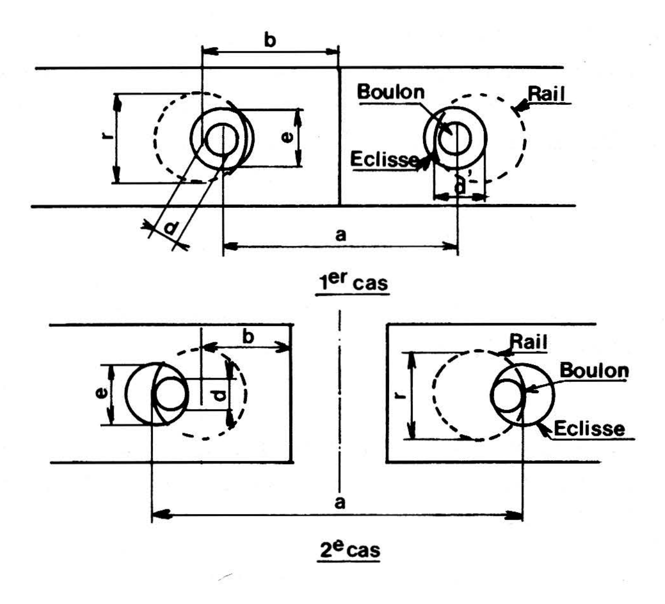


Fig. 109. — *Calcul du permissif de dilatation*

1.3.3. La fixation des permissifs de dilatation résulte des considérations que l'on peut faire sur les mouvements des rails sous l'action des variations de température.

1.4. Cheminement

Dans une voie éclissée ordinaire, les rails cheminent le plus souvent dans le sens général du mouvement des trains. On peut donner à ce phénomène les explications ci-après :

a. reptation du rail due à la déformation par flexion sous les trains, qui allonge les fibres du patin en contact avec les traverses ; comme cet allongement ne peut pas se manifester vers l'arrière où les déformations du rail sont bridées par le frottement, il tend à se développer vers l'avant.

b. libération partielle des contraintes dues à la dilatation contrariée : l'onde de soulèvement qui précède la machine autorise un allonge-

ment du rail qui libère de proche en proche une partie de la compression d'origine thermique ; la voie soulevée retombe un peu en avant de la position qu'elle occupait avant l'approche du train. Ce mouvement est combattu par les dispositifs dits anti-cheminants qui solidarisent longitudinalement le rail avec les traverses.

1.5. Mouvement du rail sous l'action des variations de température

Supposons d'abord le rail fixé librement sans contrainte. Si Θ_a est la température de pose du rail de longueur l, sa variation de longueur à la température Θ sera

$$|\Theta - \Theta_a|\ l\ a$$

a étant le coefficient de dilatation linéaire de l'acier ($10{,}5.10^{-6}$).

Θ_M et Θ_m étant les températures maximale et minimale auxquelles le rail est soumis, le jeu total devrait être l a (Θ_M - Θ_m) et la variation du jeu résiduel en fonction de la température est représentée par une droite.

Mais les mouvements sont en réalité contrariés par deux forces antagonistes : le serrage R des éclisses et le double frottement rail-traverse et traverse-ballast. Nous supposerons, comme dans la théorie des barres longues, que le premier est suffisamment énergique pour que seul intervienne le second. Sa valeur r peut varier de 500 à 1 000 kg/m pour l'ensemble des deux files tandis que la force de serrage R d'éclisses est de l'ordre de 2 à 5 t, λ étant la longueur de frottement prise en compte à partir du joint, il règne à l'extrémité de cette longueur une contrainte par rail de $F = R + \frac{r}{2}\lambda$.

Si E et S sont le module d'élasticité de l'acier et la section du rail, F entraîne une dilatation contrariée $\frac{1}{E}\frac{F}{S}\,d\lambda$ de l'élément $d\lambda$.

Si 0 est le milieu du rail et A l'extrémité, la dilatation contrariée d'une demi-barre est

$$\int_o^{l/2} \frac{F}{ES}\,d\lambda = \frac{l}{2ES}\left(R + \frac{rl}{4}\right)$$

La modification de longueur totale de la demi-barre est donc

$$\Delta l = \frac{\alpha l \Delta\Theta}{2} - \frac{l}{2ES}\left(R + \frac{rl}{4}\right) = \frac{\alpha l}{2}\left[\Delta\Theta - \frac{l}{ES\alpha}\left(R + \frac{rl}{4}\right)\right]$$

soit o_0 et Θ_0 l'ouverture de joint et la température initiale et supposons une augmentation de température. Tout d'abord R s'oppose au mouvement et o reste égal à o_o jusqu'à une température Θ telle que

$$\Theta_1 - \Theta_0 = \frac{R}{\alpha ES}$$

Le graphique des efforts prend ensuite l'allure de la fig. 110. Un élément de longueur dx est soumis d'une part à la dilatation thermique, d'autre part à la résistance de frottement ballast-traverse.

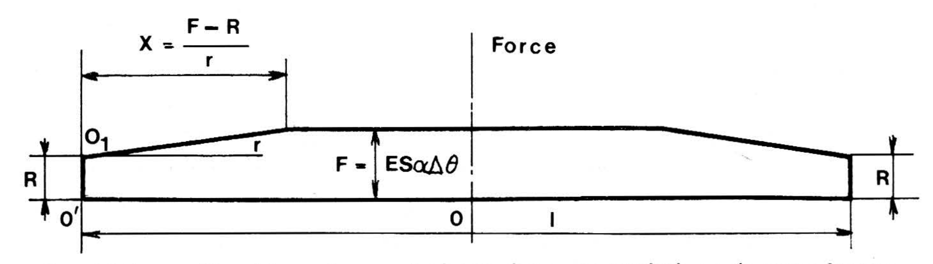


Fig. 110. — *Graphique des contraintes dues aux variations de température*

L'allongement total de cet élément dx est donc égal à

$$\alpha\Delta\Theta \, dx - \frac{\sigma dx}{E}$$

avec $F = \sigma S = rx + R$

La dilatation est totalement contrariée à une distance z de l'origine telle

$$\alpha\Delta\Theta - \frac{\sigma}{E} = 0$$

d'où

$$z = \frac{\alpha ES \, \Delta\Theta - R}{r}$$

Le déplacement δ_p d'un point P (fig. 111) est égal à

$$\delta_p = \int_M^P \left(\alpha\Delta\Theta - \frac{\sigma}{E}\right) dx = \alpha\Delta\Theta.MP - \int_M^P \frac{F\,dx}{ES}$$

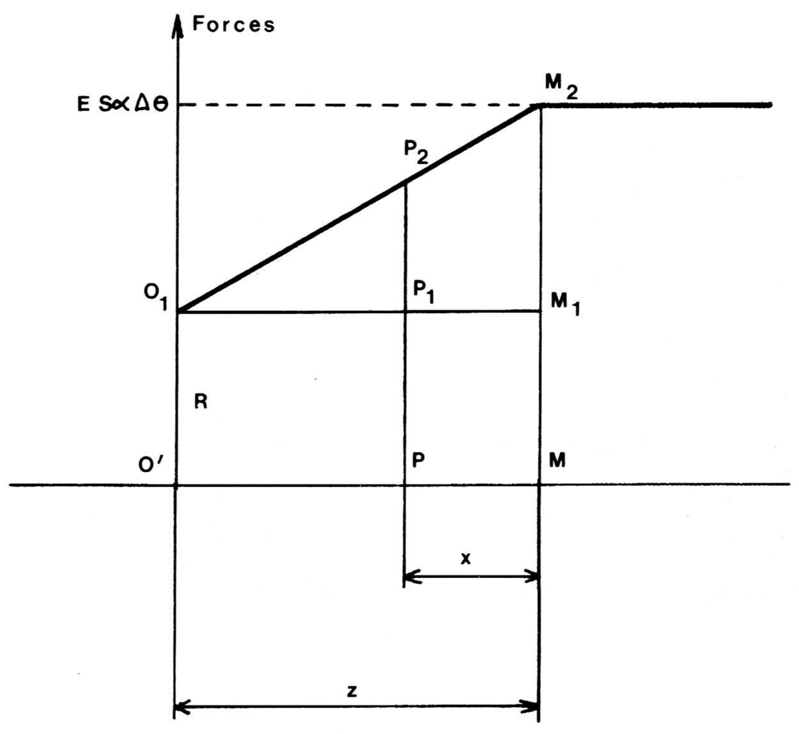


Fig. 111. — *Déplacement longitudinal d'un LRS*

La figure permet de voir que

$$M_1P_1 = x \quad \text{et} \quad M_1O_1 = z$$

Si $\qquad PP_1 = R, \qquad M_1M_2 = rz \qquad P_1P_2 = r\,(z - x)$

on en déduit : $F - r = r\,(z - x)$

Donc

$$ES\,\delta_p = (ES\alpha\Delta\Theta - R)\,x - r\int_M^P (z - x)dx$$

d'où

$$ES\,\delta_p = \frac{rx^2}{2} \quad \text{et} \quad \delta_p = \frac{rx^2}{2\,ES}$$

A l'extrémité,

$$x = z \quad \text{et} \quad \delta_E = \frac{rz^2}{2\ ES}$$

La variation d'ouverture est représentée par une parabole d'axe vertical jusqu'à ce que le mouvement atteigne la partie centrale du rail. A ce moment

$$z = \frac{l}{2} = \frac{\alpha ES\ \Delta\Theta - R}{r}$$

La dilatation se poursuit alors suivant la loi linéaire $\frac{\alpha l \Delta\Theta}{2}$ tangente à la parabole.

Supposons que, une fois la température maximale atteinte, Θ rediminue ; l'ouverture reste constante tant que $-R$ n'est pas atteinte. D'où une constance d'ouverture correspondant à une variation de température

$$\Delta\Theta = \frac{2\ R}{\alpha\ ES}$$

Si Θ continue à redescendre de $\Delta\Theta$, la force diminue uniformément de $ES\alpha\Delta\Theta$ tout au moins jusqu'au point I correspondant à une force $-R$ situé à une distance $\frac{ES\ \alpha\Delta\Theta}{r}$ de l'extrémité (fig. 112). Entre I et O où les forces de traction sont égales, le diagramme prend la forme d'un triangle isocèle dont les côtés ont r pour pente.

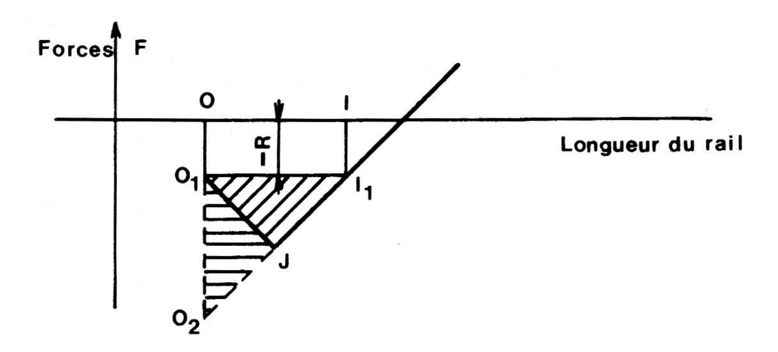


Fig. 112. — *Contraintes vers les extrémités*

Dans le calcul du déplacement de l'extrémité, le terme $\int \frac{F\,dx}{ES}$ est diminué de la surface du triangle O_1O_2J divisée par ES,

Soit,

$$\frac{1}{ES}\left[\frac{1}{2} ES\ \alpha\Delta\Theta . \frac{ES\ \alpha\Delta\Theta}{2r}\right]$$

D'où

$$\Delta\delta = \frac{ES\ \alpha^2\Delta\Theta^2}{4r} \quad \text{puisque} \quad \Delta\delta = \frac{F\,dx}{ES}$$

Le déplacement total est alors

$$\frac{ES\alpha^2\Delta\Theta^2}{2r} - \frac{ES\alpha^2\Delta\Theta^2}{4r} = \frac{ES\alpha^2\Delta\Theta^2}{4r}$$

La variation d'ouverture se fait donc suivant une parabole d'axe vertical de paramètre moitié de la précédente qui se raccorde à la loi linéaire $\alpha\ l\ \frac{\Delta\Theta}{2}$.

La figure 113 représente l'ensemble du mouvement en supposant qu'il n'y ait jamais blocage du joint et la figure 114 les diagrammes successifs de contraintes. Le mouvement est complexe et il n'y a pas correspondance univoque entre la température et l'ouverture des joints.

En réalité, par suite du cheminement, le déplacement des extrémités de rails ne s'effectue pas suivant les cycles représentés sur la figure 113. Les mouvements sont complexes et même si les ouvertures suffisantes ont été ménagées à l'origine, il peut en résulter des blocages de joint. Le problème est donc, après avoir fixé a priori l'effort maximal de compression, de déterminer la longueur sur laquelle s'appliquera la tolérance de joint (1).

Si aucune précaution de maintenance n'est prise, il peut en résulter des efforts de compression au joint, point où l'inertie est sensiblement réduite, suffisants pour entraîner une déformation de la voie par flambement.

---

(1) Se reporter à l'ouvrage du même auteur : "La voie ferrée", éditions Eyrolles.

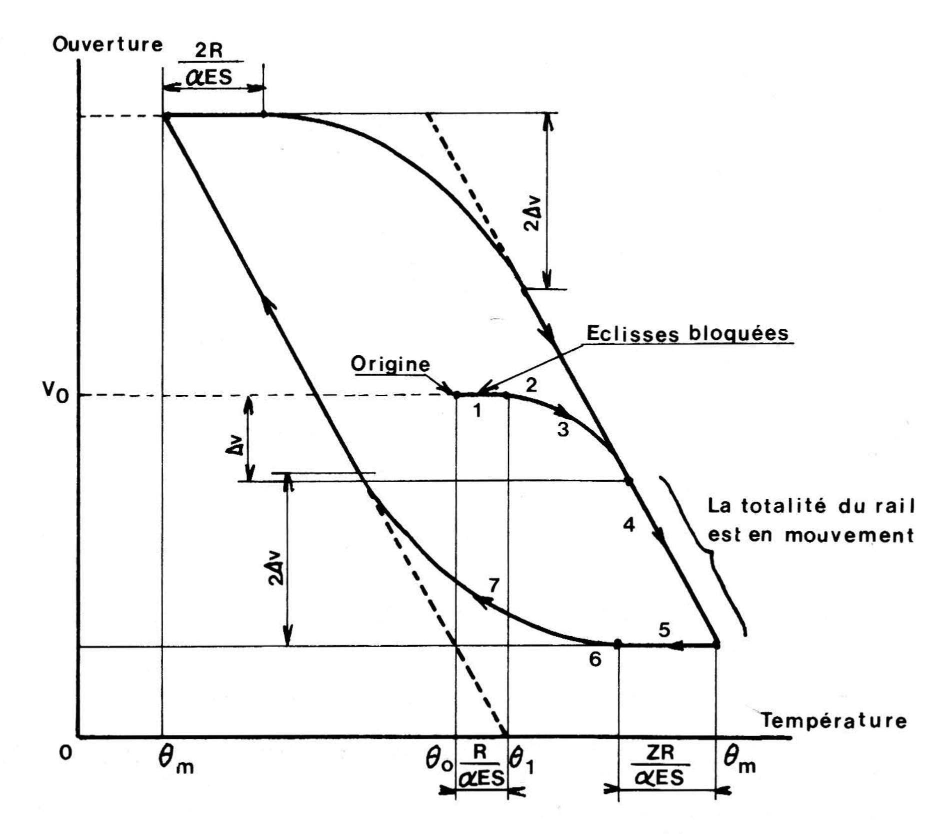


Fig. 113. — *Déplacement d'ensemble*

2. Les longs rails soudés

2.1. Généralités

2.1.1. On appelle long rail soudé (LRS) une barre dont la longueur est suffisante pour qu'un, au moins, de ses points reste fixe, quelles que soient les variations de température. Nous avons vu que les barres ordinaires se trouvent en état de dilatation partiellement contrariée ; l'étude que nous avons faite de leurs mouvements peut donc servir d'introduction à celle des LRS.

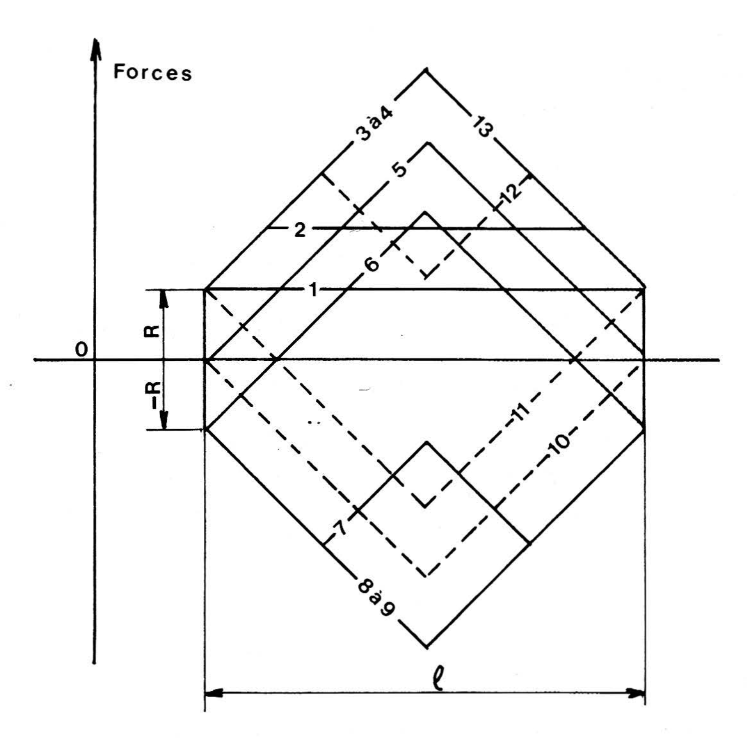


Fig. 114. — *Déformation du diagramme des contraintes en fonction de la température*

Le LRS est en état de dilatation ou de contraction totalement ou partiellement contrariée par suite du double frottement entre rail et traverse et entre traverse et ballast.

Si le frottement traverse/ballast a toujours été assuré de façon correcte, il n'en est pas de même avec le frottement rail/traverse dans le cas des attaches classiques rigides par tirefonds ou crampons. Ce n'est qu'avec les attaches doublement élastiques que le problème a pu être résolu de façon satisfaisante.

C'est pourquoi timidement apparus vers les années 30 dans certains pays (Australie, Allemagne, Egypte, USA), les LRS n'ont pris leur essor qu'une fois ces problèmes résolus (1 947 en France).

2.1.2. Les LRS offrent aux réseaux un intérêt économique évident. D'une part, on estime que l'entretien des joints (nivellement, démontage et remontage des éclisses avec remplacement éventuel, visite, rechargement des abouts) représente plus de 30 % des dépenses d'entretien de la voie.

D'autre part, la pose en LRS permet d'augmenter de 30 % environ l'intervalle entre renouvellements (24 ans au lieu de 18 ans sur ligne de groupe 1 ou 2 UIC). Il en résulte une économie annuelle d'investissement du même ordre de grandeur que l'économie d'entretien.

A ces avantages économiques s'en ajoutent d'autres non chiffrables :
- amélioration du confort des voyageurs
- diminution des nuisances acoustiques sur l'environnement
- diminution de la fatigue du matériel roulant, donc de son coût d'entretien.

2.2. Stabilité des LRS

2.2.1. Une voie posée en LRS est soumise à des compressions longitudinales pouvant atteindre 120 tonnes. Le phénomène de flambage qui peut en résulter est cependant très différent du flambage classique étudié dans la résistance des matériaux, car
- le rail est une poutre d'élancement infini
- le mouvement latéral du rail est contrarié par des forces antagonistes (en particulier le frottement des traverses sur le ballast).

Schématiquement l'analyse du phénomène a montré que, par suite, par exemple de la compression longitudinale dans une zone prédéformée, la voie peut se décharger localement et que de ce fait, il y a une réduction sensible de la résistance latérale de frottement de ballast, cette diminution pouvant atteindre une valeur telle que plus rien ne s'oppose au flambement latéral.

Les études expérimentales et l'analyse mathématique ont mis en évidence les deux points suivants :
- l'existence de défauts préalables est nécessaire pour qu'un phénomène de flambement se produise
- les stabilités dans le plan vertical et dans le plan horizontal ne sont pas indépendantes. Une modification de la réaction d'appui ver-

tical de traverse sur le ballast, conséquence d'un défaut de tracé et de l'augmentation de l'effort de compression, entraîne une variation de la résistance de la voie aux déformations transversales.

Nous étudierons donc successivement les deux cas de la stabilité dans le plan vertical et dans le plan horizontal.

L'analyse mathématique du problème est assez simple, tout au moins dans le plan vertical, en admettant que la voie est déformée suivant une sinusoïde. Bien que la probabilité d'apparition d'un tel défaut soit faible, cette forme d'étude permet l'analyse d'un défaut quelconque à l'aide d'une décomposition en série de Fourier.

Le calcul n'est d'autre part aisé qu'en linéarisant trois fonctions expérimentales :

— enfoncement vertical d'une traverse en fonction de l'effort
— déplacement transversal d'une traverse en fonction de l'effort
— couple d'encastrement rail/traverse.

Une telle linéarisation est correcte pour la première fonction ; il n'en est pas de même pour les deux autres et il faut admettre qu'entre deux limites symétriques les fonctions représentatives sont linéaires mais qu'au-delà, les efforts sont constants, quelles que soient les déformations.

On est donc amené à envisager deux conditions critiques :

— la première où la valeur limite est atteinte en un seul point et où les forces résistantes limitent les déformations à de faibles valeurs ;
— la deuxième où la valeur limite est atteinte partout et peut conduire à une déformation importante.

2.2.2. Stabilité dans le plan vertical

On supposera le rail d'ordonnée z sans déformation permanente (2), la voie posée sur une plateforme déformée suivant une sinusoïde et le module d'élasticité du sol suffisamment grand pour qu'on puisse admettre :

$$z = z_1 \quad \forall x$$

(2) La limite élastique n'a été dépassée en aucun point et le rail épouse rigoureusement la forme de la surface sur laquelle il est posé.

Le profil en long de la plateforme a pour équation

$$z_1 = l \cos \omega x$$

avec

$$\omega = \frac{2\pi}{L}$$

soit $\overline{\omega}$ le poids linéaire de la voie et r la résistance linéaire du ballast sous les traverses, supposée uniformément répartie.

L'équation d'équilibre est alors, en appelant F l'effort dans le rail dû à la dilatation contrariée,

$$EI \frac{d^4z_1}{dx^4} + F \frac{d^2z_1}{dx^2} + (\overline{\omega} - r) = 0$$

d'où, puisque $z_1 = b \cos \omega x$

$$r = \overline{\omega} + (EI\omega^4 - F\omega^2)b \cos \omega x$$

Pour $F < \frac{4\pi^2EI}{L^2}$ la voie est surchargée sur les bosses et déchargée dans les creux. Ceci est en particulier vrai pour $F \leqslant 0$.

Pour $F > \frac{4\pi^2EI}{L^2}$ le terme $EI\omega^4 - F\omega^2$ est négatif.

Dans ces conditions $r > \overline{\omega}$ dans les creux et $r < \overline{\omega}$ sur les bosses. Il y a donc allègement apparent de la voie sur ces bosses et surcharges dans les creux.

Par forte température, F peut atteindre une valeur suffisante pour que r s'annule au sommet de la bosse. Dans ce cas

$$b\,(EI\omega^4 - F\omega^2) = -\overline{\omega} \qquad \text{ou} \qquad b = \frac{\overline{\omega}}{F\omega^2 - EI\omega^4}$$

Cette valeur critique b_c est minimale pour F donné lorsque

$$\omega^2 = \frac{F}{2\,EI} \qquad \text{ou} \qquad L^2 = \frac{8\pi^2\,EI}{F}$$

Dans ces conditions $b = \frac{4\overline{\omega}EI}{F^2}$

C'est la première condition critique : plus petite amplitude d'un défaut de nivellement préexistant qui entraîne l'annulation de la réaction de traverse en sommet de bosse.

Si $F > \frac{4\pi^2 EI}{L^2} + \frac{\overline{\omega} L^2}{4\pi^2 b}$ la voie est particellement décollée de la plate-forme au sommet des vosses et les équations précédentes ne sont donc plus valables. Une plage de voie décollée, symétrique par rapport au sommet, se développe progressivement (fig. 115). La longueur de cette place augmente avec F jusqu'à ce que l'appui de la voie ne se fasse plus qu'aux seuls points bas. On atteint alors la deuxième condition critique. F, concentrée en un point ne peut plus augmenter : c'est la limite de flambage.

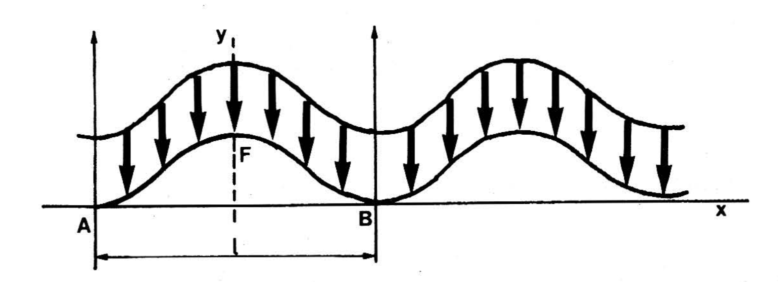


Fig. 115. — *Profil longitudinal de LRS*

La voie est alors soulevée en tous les points, sauf aux seuls points bas des ondes.

Tous calculs faits, le cas le plus défavorable s'obtient par

$$l = 9\sqrt{\frac{EI}{F}} \qquad f = 15{,}75\,\frac{\overline{\omega} EI}{F^2}$$

Il s'agit d'un équilibre instable.

En fait, les flèches critiques sont encore supérieures à celles-ci, car lorsque la barre décolle, il se produit un allongement de la fibre neutre et, par suite, une diminution des contraintes d'origine thermique. L'étude complète a été faite et conduit à des valeurs plus élevées que celles citées ci-dessus. Pour le rail 50 kg U 36 ($EI = 425.10^4$ et $\overline{\omega} = 0{,}125.10^4$ Nm) et un écart de 45° par rapport à la température neutre (F = 72,5 t) on obtient pour la première condition critique et dans le cas le plus défavorable

$$L = 21{,}30 \text{ m}$$
$$b_c = 40{,}50 \text{ mm}$$

En fait, comme sur la voie on mesure le profil par rapport aux points hauts, les défauts correspondants apparaissent comme une série de creux de 80 mm de profondeur, espacés de 20 m. De tels défauts de nivellement ne se rencontrent jamais. Il ne peut donc se produire de décollement de la voie par élévation de température. Toutefois, sur les bosses, la danse de certaines traverses peut augmenter avec diminution corrélative de la résistance transversale. A fortiori, le défaut correspondant à la limite de flambage qui est sensiblement double n'a aucune probabilité d'exister dans la voie.

Pour un défaut vraisemblable (L = 20 m, b = 10 mm) on trouve cependant que le frottement des traverses sur le ballast est réduit de 26 % par rapport à celui de la même voie sans défaut de nivellement. Il en résulte une réduction de la résistance latérale de la voie préjudiciable à la stabilité dans le plan horizontal.

2.2.3. Stabilité dans le plan horizontal

L'analyse mathématique complète du phénomène a été effectuée par la SNCF (3) mais nous nous contenterons d'en donner les résultats pour éviter des calculs longs et fastidieux.

La linéarisation de la fonction T, résistance du ballast, conduit à distinguer deux conditions critiques :

a. La résistance limite du ballast T est atteinte en un seul point du défaut sinusoïdal
   - longueur d'onde la plus défavorable (4) $L_1 = 8{,}9 \sqrt{\frac{EI}{F_1 - K}}$
   - amplitude critique $a_1 = 8 \frac{TEI}{(F_1 - k)^2}$

b. La résistance limite de ballast est atteinte en tous les points
   - longueur d'onde la plus défavorable $L_2 = 8{,}86 \sqrt{\frac{EI}{(F_2 - K)}}$
   - deuxième amplitude critique $a_2 = 10{,}2 \frac{TEI}{(F_2 - k)^2}$

---

(3) N[os] 3 et 4 des "Informations Techniques" de la Direction des Installations Fixes de la SNCF.

(4) K est le rapport couple/angle de rotation rail-traverse supposé constant et également réparti le long de la voie, il s'exprime en N et est donc de même dimension que F.

Pour une voie armée en rails de 50 kg, une variation de température de 45° et une résistance limite du ballast $2T = 0{,}7.10^4$N, on trouve

$$L_1 = L_2 = 10{,}50 \text{ m}$$
$$a_1 = 38 \text{ mm}$$
$$a_2 = 47 \text{ mm}$$

Ces valeurs qui correspondent pour la première à une flèche de 76 mm sur une corde de 10 m ne se rencontrent jamais en voie.

Le calcul (fig. 116) montre que la déformation croît lentement jusqu'à la limite du domaine linéaire puis on passe très rapidement à la limite du flambage : il faut donc éviter de se rapprocher du domaine linéaire : il y a intérêt à ce que la voie soit la mieux dressée possible.

L'influence des courbes est équivalente à une réduction de la résistance latérale limite $\Delta T = \frac{F}{R}$.

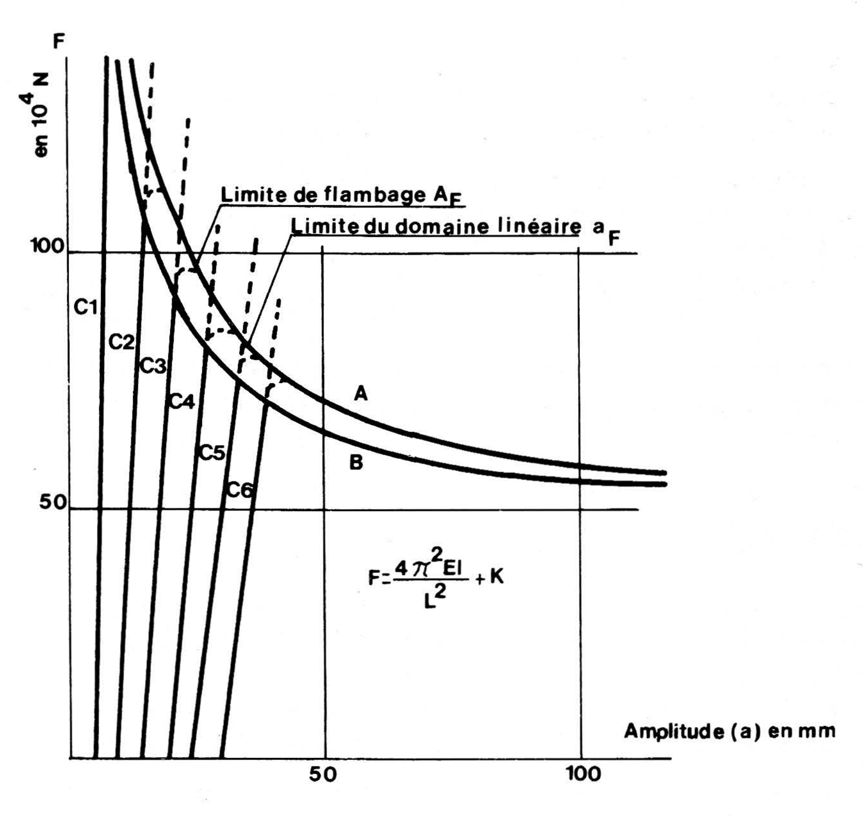


Fig. 116. — *Graphique de stabilité dans le plan horizontal*

Les défauts de linéarité du rail (5) qui jouent un rôle très important sont de deux types :

— défauts assimilables à une sinusoïde (défaut de dressage en usine ou rail tordu en cours de manutention)
— défauts angulaires résultant d'une soudure mal exécutée.

Leur influence est surtout importante dans le plan horizontal où leur action est équivalente à une réduction de la valeur limite de la résistance latérale.

A titre indicatif, la résistance transversale du ballast est diminuée de 20 %

— pour un défaut sinusoïdal de 2,5 mm d'amplitude et de 10 m de longueur d'onde
— pour un défaut angulaire de 1 millième de radian.

On peut tirer de cette étude les conclusions fondamentales suivantes :

— aucune instabilité ne peut se produire dans le plan vertical
— pour qu'une instabilité se produise dans le plan horizontal, il faut :
— soit un défaut de tracé très important, improbable dans les conditions normales d'entretien, mais pouvant résulter d'un effort anormal provenant d'un véhicule très instable
— soit une diminution de la résistance transversale résultant
  • d'un défaut de ballastage
  • d'un défaut de linéarité du rail
  • d'un défaut de nivellement concomittant au défaut de tracé.

Il convient donc de souligner l'importance de la rectitude des LRS, fonction à la fois des conditions de fabrication et des conditions de maintenance.

2.2.5. Pose des LRS

Elle doit être opérée à une température des contraintes nulles aussi équidistante que possible des températures extrêmes (p. ex. de − 15 et 60° en France) en tenant cependant compte du fait qu'une déformation par la chaleur en été présente plus de risques qu'une rupture en hiver, le plus souvent détectée par la signalisation (circuits de voie).

---

(5) Nous renvoyons le lecteur aux "Informations Techniques" pour le détail des calculs.

La température de pose s'obtient naturellement ou par chauffage au gaz. On peut également opérer par traction avec des vérins hydrauliques (fig. 117).



Fig. 117. — *Vérin hydraulique de traction*

2.2.6. Dilatation des LRS

Rien ne s'oppose à la pose d'une barre de longueur indéfinie, la contrainte longitudinale étant indépendante de la longueur. Toutefois des points singuliers (ouvrages d'art) obligent à réaliser un joint. On observe des mouvements longitudinaux au voisinage de ces points singuliers.

Le calcul des contraintes et du mouvement des extrémités de barres longues a été fait dans le paragraphe consacré à l'éclissage pour les barres normales.

Le tableau N° 22 donne les valeurs correspondantes de compression longitudinale qui en résultent pour une différence de 45° avec la température de libération

Rails	ES α	Effort de compression par file de rail
46 kg	1,35	60 t
50 kg	1,45	65 t
60 kg	1,73	78 t

TABLEAU 22

ce qui correspond à un effort unitaire de 10,1 Hb.

Si X est la longueur de respiration, on a

$$R = rX = ES\ \alpha\Delta\Theta$$

soit

$$X = \frac{ES\ \alpha\ \Delta\Theta}{r}$$

Le tableau N° 23 donne les longueurs de respiration pour des valeurs de r de 250 et 600 daN, c'est-à-dire pour des voies non stabilisées et complètement stabilisées

Rails	r = 250 daN/m	r = 600 daN/m
46 kg	240 m	100 m
50 kg	260 m	108 m
60 kg	312 m	130 m

TABLEAU 23

Le déplacement d'une extrémité est égal à

$$\frac{ES\ \alpha^2\ \Delta\Theta^2}{2r}$$

Pour du rail de 50 kg et une différence de température de 45°, on obtient 26 mm pour r = 600 daN/m et 62 mm pour r = 250 daN/m.

2.2.7. Tous les problèmes relatifs aux opérations d'entretien nécessitées par les barres longues, telles que le remplacement d'un élément de rail, sont réglés à partir de la remarque suivante :

Soit un LRS dans lequel on veut régulariser les contraintes entre A et B par libération partielle (fig. 118). Les variations du diagramme des contraintes à la température T signifient simplement que la température neutre Θ de chaque point est variable.

Soit Θ_1 et Θ_2 ces températures neutres avant et après égalisation des contraintes.

En tout point on a : $\sigma_1 = E\alpha\ (T - \Theta_1)$
$\sigma_2 = E\alpha\ (T - \Theta_2)$

La variation de longueur $d\delta$ d'un élément dx est

$$d\delta = \frac{\Delta\sigma}{E}\,dx = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{E}\,dx$$

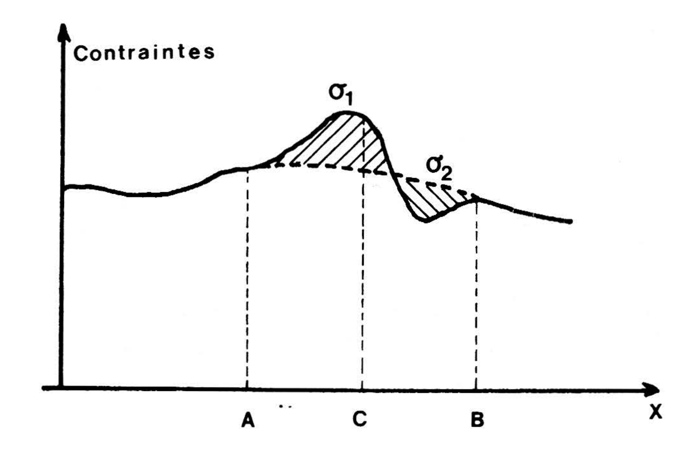


Fig. 118. — *Libération partielle*

Le point C, par exemple, se déplace de

$$\int_A^c d\delta = \frac{1}{E} \int_A^c (\sigma_2 - \sigma_1)\, dx = \alpha \int_A^c (\Theta_1 - \Theta_2)\, dx$$

Comme A et B sont fixes, on en déduit

$$\int_A^B (\sigma_2 - \sigma_1)\, dx = 0$$

D'où la règle fondamentale de l'égalité des surfaces hachurées sur le diagramme des contraintes en cas de mouvement entre deux points fixes.

La libération partielle d'un élément de LRS, en vue d'effacer un pic de contrainte, se détermine suivant la règle fixée sur la figure 119 dans laquelle la surface du triangle est égale à la somme de celles des deux parallélogrammes accolés.

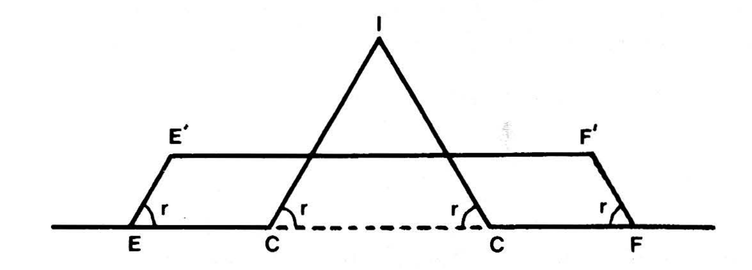


Fig. 119. — *Effacement d'un pic de contraintes*

2.3. Mesure des contraintes dans les LRS

2.3.1. L'évolution des contraintes dans les LRS telle que nous venons de la décrire ne permet pas d'en connaître l'importance : l'immobilité du rail ne permet pas en effet l'utilisation de jauge de contraintes, hormis par le truchement de trous percés dans le rail dont on peut mesurer la déformation par ovalisation, mais ce procédé n'est évidemment pas viable pour une analyse systématique.

Comme il serait particulièrement intéressant de connaître cette répartition des contraintes, en particulier pour intervenir par libération partielle dans des zones où des pics auraient pu se produire, les USA et l'ORE ont analysé un certain nombre de phénomènes mécaniques, acoustiques, électriques ou magnétiques, apparemment liés à la contrainte du métal en chaque point. Tous ces procédés se sont soldés par un échec, les variations locales dues à des hétérogénéités ou d'autres phénomènes physiques amenant une dispersion inadmissible des résultats.

Seule la méthode de paramètres magnétiques consistant à magnétiser l'âme du rail et à mesurer l'écart de champs coercitifs positif et négatif, d'autant plus large que la contrainte de compression est élevée, donne des résultats acceptables. Malheureusement, cette méthode ne permet que des contrôles ponctuels et il est exclu qu'elle puisse servir à des enregistrements continus, ce qui serait évidemment l'idéal. Elle nécessite en outre la connaissance des contraintes internes et du coefficient d'effet élastomagnétique. Elle est en outre liée à l'état de contrainte de l'âme seule. On peut donc dire pour conclure que le problème de la mesure continue des contraintes n'est pas résolu.

2.3.2. En cas de rupture d'un rail soudé en période de froid, il se produit une lacune en fonction de l'écart entre température neutre et température de rupture.

L'application de la règle mentionnée en 2.2.7. permet d'introduire un coupon de rail, au droit de la rupture, sans modifier l'équilibre de la barre. A cet effet, on remplace une longueur d'environ 4 m par un coupon de longueur strictement équivalente à la température d'exécution du travail et l'on rétablit le contact entre les différents morceaux de rail (compte tenu de l'épaisseur des intercalaires de soudure) par chauffage des extrémités adjacentes.

2.4. Utilisation des LRS

Actuellement, les poses neuves sont systématiquement faites dans la plupart des pays en LRS. En France, où il existe maintenant 25 000 km de voies équipées en LRS, les barres sont soudées par étincelage dans quatre ateliers en longueurs de 288 et 336 m. Elles sont ensuite transportées sur des rames spécialement équipées (fig. 120) jusqu'à l'emplacement de la pose, puis, après mise en voie, les tronçons sont raccordés entre eux par soudure électrique ou aluminothermique.

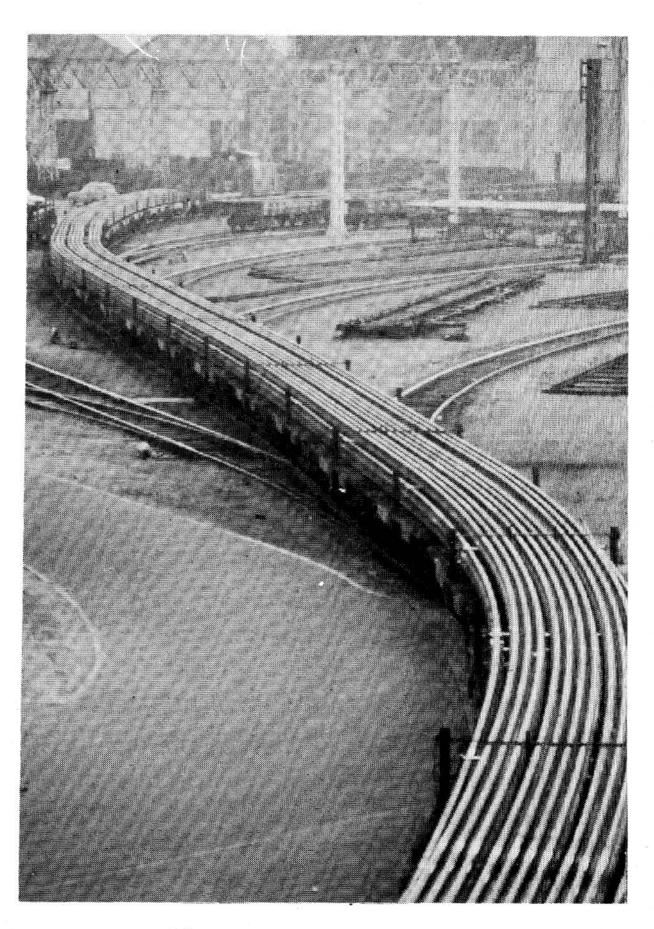


Fig. 120. — *Rame de transport de LRS*

Les constatations faites sur les voies posées depuis vingt ans permettent d'estimer à 30 % environ l'ordre de grandeur des économies d'entretien procurées par ce type de pose, du fait de la suppression des joints. Si l'on compare le comportement de deux voies, l'une soudée, l'autre non soudée, on constate, après achèvement de la période de stabilisation, que la voie classique révèle en peu de temps des défauts de nivellement qui s'aggravent assez vite si l'on ne vient pas les corriger, particulièrement aux joints, alors que les défauts de même nature de la voie soudée ont par contre une forme très allongée et n'évoluent que très lentement. Cette différence de comportement est donc génératrice d'économies concernant à la fois la tenue du matériel, du nivellement et du dressage.

Il faut en outre noter que bien des renouvellements de voie ou tout au moins de rails, sont la conséquence de l'usure des abouts de rails et de la mauvaise tenue du joint qui en résulte.

Toutes dépenses confondues, la DB estime à près de DM 1 500 (1984) par kilomètre l'économie annuelle procurée par les LRS. De tout ceci apparaît l'importance pour les LRS des problèmes de soudure, tant à la fabrication qu'à la pose et à l'entretien, problèmes que nous allons maintenant analyser.

3. Soudures

3.1. Les LRS n'ont pu se développer que grâce aux solutions apportées à trois problèmes fondamentaux :

— des fixations rails sur traverses indesserrables ou tout au moins assurant pendant un temps suffisamment long une solidarité assez élevée entre rails et traverses pour empêcher tout mouvement relatif. Divers types d'attaches répandues dans le monde apportent des solutions plus ou moins satisfaisantes à ce problème ;

— une théorie sûre de la stabilité transversale des LRS et les mesures qui en découlent pour leur pose et leur maintenance. Nous venons d'évoquer ce problème complètement résolu en France vers 1964 ;

— des systèmes de soudage donnant une qualité métallurgique des soudures pratiquement équivalente à celles des rails adjacents et capables par conséquent de résister aussi bien que le rail aux divers

efforts décrits dans le chapitre 3. C'est cette question que nous allons maintenant examiner.

Avant d'aborder la description des divers systèmes utilisés, il convient de procéder à quelques remarques d'ordre général concernant la soudure.

a. Incidence sur le métal de base

Nous avons vu que l'acier à rail était fortement carburé et qu'au cours d'un refroidissement trop rapide d'un acier trempant, on court le risque de faire apparaître une structure martensitique, dure mais très fragile. C'est pourquoi tous les procédés de soudage nécessitent diverses précautions ayant pour but d'emmagasiner suffisamment de calories pour ralentir la vitesse de refroidissement de façon à franchir les courbes en S, afin d'éviter toute structure de trempe. Une durée de refroidissement de 3 minutes entre 800° et 500° est suffisante pour des rails de nuance normale ou naturellement dure ; mais il faut 6 minutes pour des rails durs alliés. Donc pour des aciers particulièrement trempants (alliés ou à haute teneur en carbone), ce préchauffage peut ou doit être complété par une protection de la soudure par enveloppe calorifuge ou même par un postchauffage permettant une "normalisation" du produit par obtention d'une structure perlitique fine de revenu. La figure 121 montre, par comparaison avec le refroidissement en usine que si les soudures de nuance 70 et 90 peuvent être refroidies naturellement, il n'en est pas de même pour les aciers alliés.

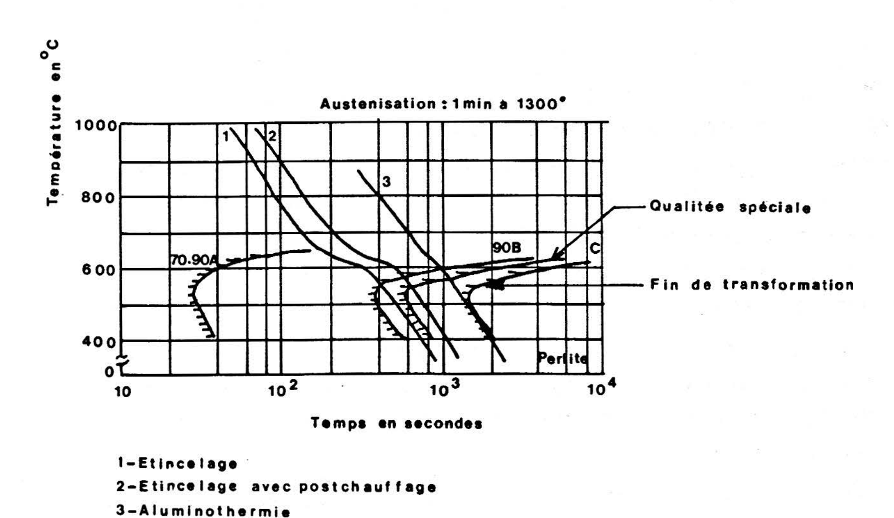


Fig. 121. — *Conditions de refroidissement des soudures*

b. Suivant le type de soudure, il y a ou non métal d'apport. Dans le premier cas, la nature du métal d'addition doit être soigneusement étudiée pour s'adapter à celle du rail de base et tenir compte de la décarburation de la ligne de soudure. Dans le second cas, il y a en principe meilleure homogénéité de la soudure, mais perte de métal, donc raccourcissement des rails par rapport à leur longueur d'origine.

c. Le préchauffage des abouts est à l'origine d'une diminution de la dureté superficielle du rail, si bien que la soudure étant en général d'une dureté élevée, il existe une zone de transition moins dure et impossible à supprimer entre la soudure et le rail proprement dit : il importe que cette zone soit la plus courte possible.

d. La soudure peut s'effectuer en atelier ou en voie sur le tas. L'atelier, qu'il soit fixe ou mobile, permet l'emploi de machines plus lourdes, une protection complète contre les intempéries, donc une excellente qualité géométrique et métallurgique du travail exécuté. C'est pourquoi, dans le cas de pose neuve ou dans le cas de retraitement systématique de rail de réemploi, cette solution est techniquement la meilleure.

Il est cependant possible que, comme l'ont montré des études de prix de revient a priori, la soudure électrique en voie devienne économiquement justifiée lorsque la sidérurgie fournira des rails de 72 m de longueur.

Il résulte de tout ceci qu'à l'heure actuelle, les procédés les plus courants sont en atelier la soudure électrique par étincelage et en voie la soudure aluminothermique ou la soudure mobile par étincelage pour les chantiers systématiques.

e. On peut souder des rails neufs ou des rails de réemploi par passage en atelier comme nous le verrons ultérieurement. On peut également raccorder en voie des barres usées dont les extrémités sont encore géométriquement correctes.

3.2. Mais la soudure est aussi un puissant outil de réparation en voie, soit du rail, soit des cœurs de croisement en acier au manganèse ; la mise en œuvre des moyens est souvent délicate, mais on peut dès à présent signaler que la soudure permet :

— le rechargement des abouts usés
— la réparation de défauts superficiels (empreintes de patinage, de billages, pailles, etc...)
— la réparation de certaines fissurations transversales verticales.

3.3. Les procédés de soudure les plus couramment utilisés sont :
— la soudure électrique par étincelage en chantiers fixes ou mobiles
— la soudure électrique par induction
— la soudure aluminothermique
— la soudure à l'arc pour rechargement manuelle ou automatique.

D'autres procédés sont moins couramment utilisés :
— la soudure oxyacétylénique
— la soudure à l'arc de rails entre eux.

Enfin, dans l'avenir, on pourra sans doute utiliser sous réserve d'un prix de revient compétitif :
— la soudure par bombardement électronique
— le faisceau laser.

Les procédés de soudures par friction ou par ultrasons ne semblent pas adaptés au problème du rail.

La soudure par résistance pure, utilisée pour des pièces de faible section est totalement inadaptée au problème du rail compte tenu de la puissance trop importante qu'elle nécessiterait et de l'impossibilité de maintenir une profondeur de chauffe convenable à l'intérieur du rail.

3.4. Nous allons maintenant passer en revue les divers procédés en notant au préalable que le soudage en bout par étincelage avec préchauffage est la méthode la plus employée, car elle est la plus rapide, la qualité des soudures étant liée par ailleurs à la répartition de la température. Ce problème étant complètement résolu par les machines actuelles conçues en particulier par Matix Industries, on obtient des soudures d'excellente qualité. L'inconvénient de cette méthode réside dans la puissance importante appelée pendant les accostages durant la phase de préchauffage. Cette puissance peut être réduite au strict minimum par l'augmentation de la résistance des contacts, en réduisant l'effort pendant les accostages.

L'URSS a développé le soudage par étincelage continu (sans préchauffage) pour réduire la puissance d'alimentation.

Cette méthode double le temps de soudage avec des résultats métallurgiques comparables aux soudures avec préchauffage. A noter que les machines Matix peuvent également souder par étincelage continu par le jeu d'un interrupteur sur le pupitre de commande.

En vue de réduire les temps de soudage par étincelage continu, on a également mis au point en URSS une méthode de soudage par étincelage et impulsions consistant à rompre mécaniquement les contacts élémentaires pendant l'étincelage grâce à des vibrations mécaniques de 0,2 à 0,3 mm d'amplitude avec une fréquence de 12 à 20 Hz.

Les résultats métallurgiques en sont aussi comparables au soudage par préchauffage et étincelage. Cette méthode permet, selon ses auteurs, de diminuer la perte de métal à l'étincelage et au refoulement.

Mais la haute fréquence mécanique des oscillations entraîne des difficultés pour le parfait blocage des vis et écrous. Nous nous limiterons donc à l'étude des soudeuses classiques type Matix 304 TS ou plus récemment 453 CC.

3.5. Soudage par étincelage

3.5.1. Le soudage par étincelage, système sans apport de métal comporte cinq phases : la mise en place des rails dans la machine, le préchauffage, l'étincelage après pré-étincelage éventuel, le forgeage ou soudage proprement dit, enfin l'ébavurage du bourrelet de soudage.

a. *Mise en place*

Les extrémités des rails à souder doivent être soigneusement brossées, grenaillées ou meulées à la meule abrasive pour éliminer toute trace de rouille ou de calamine afin d'assurer un contact électrique aussi parfait que possible entre les électrodes et le rail.

La machine (fig. 122) comporte deux paires de mâchoires en cuivre au chrome adaptées aux divers profils de rails, l'une fixe qui maintient le dernier rail soudé, l'autre mobile qui permet par des mouvements longitudinaux d'assurer les accostages successifs de préchauffage. Sur les machines fixes, des déplacements dans les directions verticales et transversales permettent de régler au préalable l'alignement des rails à souder. Cet alignement se fait en général à l'aide d'une règle d'un mètre sur la file de roulement puis sur la surface de roulement, les tolérances de fabrication des rails ne permettant cependant pas une coïncidence parfaite des deux profils à souder. Cette opération peut également être réalisée automatiquement à l'aide de palpeurs dans les plans horizontaux et verticaux. Il convient dans ce réglage de tenir compte des déformations différentielles intervenant

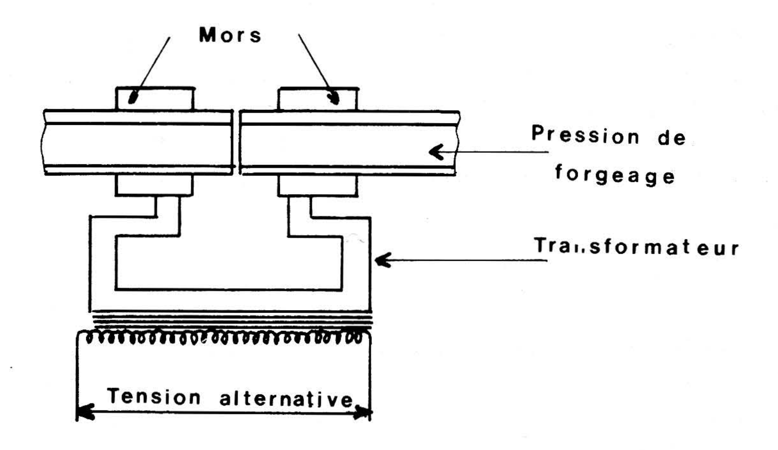


Fig. 122. — *Principe du soudage par étincelage*

au refroidissement, le patin se refroidissant plus vite que le champignon, d'où une soudure légèrement bombée. Une fois réalisé cet alignement dont la précision conditionne la qualité géométrique finale de la soudure, le rail est fixé définitivement par les mors et n'est plus soumis qu'à des mouvements longitudinaux d'avance et de recul. L'ensemble des phases suivantes est alors piloté de façon totalement automatique.

b. *Préchauffage*

Les mâchoires de la soudeuse servent en même temps d'électrodes d'amenée de courant sur le dessus du champignon et sous le patin ou sur les deux côtés de l'âme. Des mâchoires auxiliaires non conductrices peuvent parfaire le serrage. Si les surfaces à souder ne sont pas parfaitement dressées, il peut être nécessaire de procéder à un pré-étincelage qui élimine les inégalités de contacts. Ce traitement n'est plus actuellement nécessaire compte tenu de la qualité géométrique des rails traités. Vient alors la phase de préchauffage au cours de laquelle on procède à des accostages successifs au cours desquels les aspérités des deux extrémités de rails entrent en contact et s'échauffent jusqu'à la fusion en créant des ponts liquides qui éclatent en formant de petits cratères. Progressivement, après une dizaine de tels accostages, la chaleur se transmet aux deux extrémités de rails qui atteignent finalement la température de départ en étincelage. Les déplacements du support peuvent être assurés mécaniquement, hydrauliquement ou par commande électronique.

c. *Étincelage*

Cette phase est caractérisée par une avance à vitesse constante puis accélérée suivant une loi prédéterminée. Pendant cette avance, des contacts ponctuels entre les extrémités des rails se créent et s'échauffent, des ponts liquides se forment et la pression de vapeur à l'intérieur de ces ponts liquides les fait éclater et provoque l'expulsion violente dans le plan transversal de particules d'oxyde pouvant subsister et protège en même temps la soudure contre l'oxydation. Cette phase doit son nom à la gerbe d'étincelles projetées à grande vitesse (jusqu'à 60 m/s) dans le plan perpendiculaire au rail, étincelles constituées de particules de quelques millimigrammes à quelques grammes. La vitesse d'avance doit être supérieure à celle qui correspond à la quantité de métal enlevé.

d. *Forgeage*

A la fin de l'étincelage, on exerce une pression de forgeage de l'ordre de 50 à 70 Nmm^2 qui assure la cohésion de la soudure et crée un bourrelet qu'il est ensuite nécessaire de faire disparaître.

e. *Ebavurage*

Le bourrelet est enlevé dès la soudure terminée par deux couteaux épousant la forme du rail avec une précision de l'ordre de 0,3 mm pour le champignon. L'incorporation de l'ébavureuse dans la machine à souder facilite le refroidissement contrôlé. Dans ce cas, les couteaux sont mis automatiquement en place par vérins hydrauliques lors de l'achèvement de la soudure. L'ébavureuse hydraulique doit fonctionner dans le sens de la compression de la soudure et non de sa traction, sinon on risque de créer à l'intérieur du plan de soudure des micro-déchirures pouvant ultérieurement dégénérer en fissures puis en ruptures. La précision finale est obtenue par dressage et meulage post-opératoires.

On peut éventuellement ajouter un postchauffage pour traiter dans la machine (par induction ou résistance) ou à l'extérieur (induction ou gaz) certains aciers durs et soumettre ensuite la soudure à un refroidissement lent sous couvercle isotherme pour éviter la formation de structures de trempe. Pour ne pas ralentir la cadence, il est cependant souhaitable que ce post-chauffage soit réalisé en dehors de la soudeuse proprement dite. Les soudeuses d'une puissance de l'ordre de 300 KVA fonctionnent sous une tension de 5 à 9 V avec une intensité de 40 000 à 60 000 ampères. La conception des électrodes d'amenée de courant doit permettre une répartition aussi équilibrée que possible des lignes de courant au travers de la section des rails.

3.5.2. En fonction du profil et de la nuance d'acier on peut jouer sur un grand nombre de paramètres : nombre, amplitude et durée des accostages, vitesse d'étincelage et pression de forgeage. Le graphique de la figure 123 illustre bien les phases successives et met en évidence les paramètres de soudage (mouvement, pression, intensité, tension, etc.). L'enregistrement systématique des divers paramètres permet un contrôle à la fois en temps réel et a posteriori de la qualité des soudures obtenues.

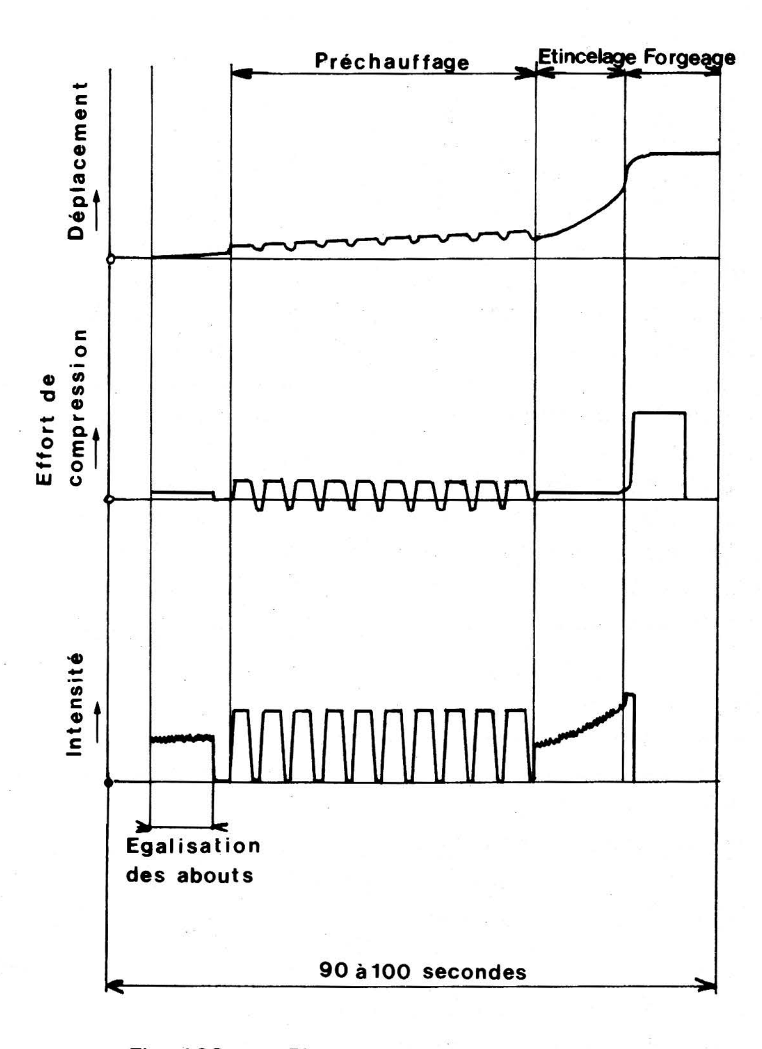


Fig. 123. — *Phases de soudage par étincelage*

La qualité de la soudure contrôlée par des essais de choc est au moins égale à celle du métal de base. La dureté superficielle est de l'ordre de 350 HB dans la zone affectée par le chauffage. La zone de transition peut être affectée d'une certaine décarburation d'où une sorte de vallée dans la dureté (fig. 124) qui doit être aussi courte que possible et qui est liée à l'importance du chauffage.

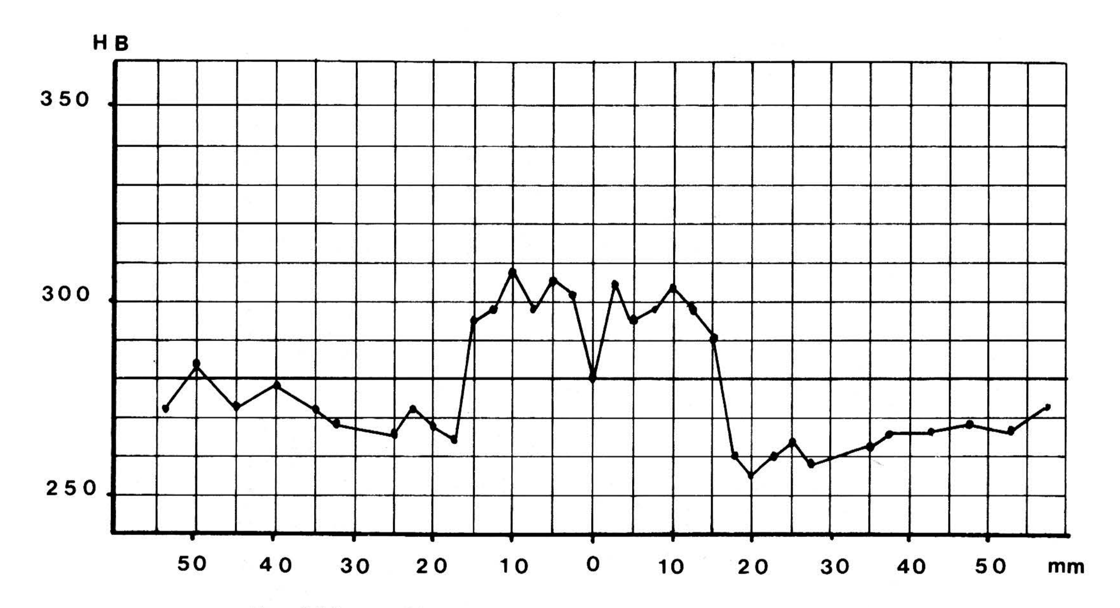


Fig. 124. — *Variation de dureté dans la zone de soudure*

Une coupe longitudinale d'une soudure électrique ou par induction permet de bien voir les différentes zones du métal transformées par la chaleur (fig. 125) :

- au centre, une ligne mince blanche constituée par de la ferrite, donc pratiquement décarburée, qui doit être aussi fine que possible ;
- à quelques millimètres du plan de soudure, on observe un grain grossier fortement chauffé : cette zone dure et trempable peut parfois révéler des traces de martensite ;
- une structure normale à 10 ou 15 mm du plan de soudure ;
- une zone de perlite globulaire ;
- enfin, le métal de base non affecté par la soudure.

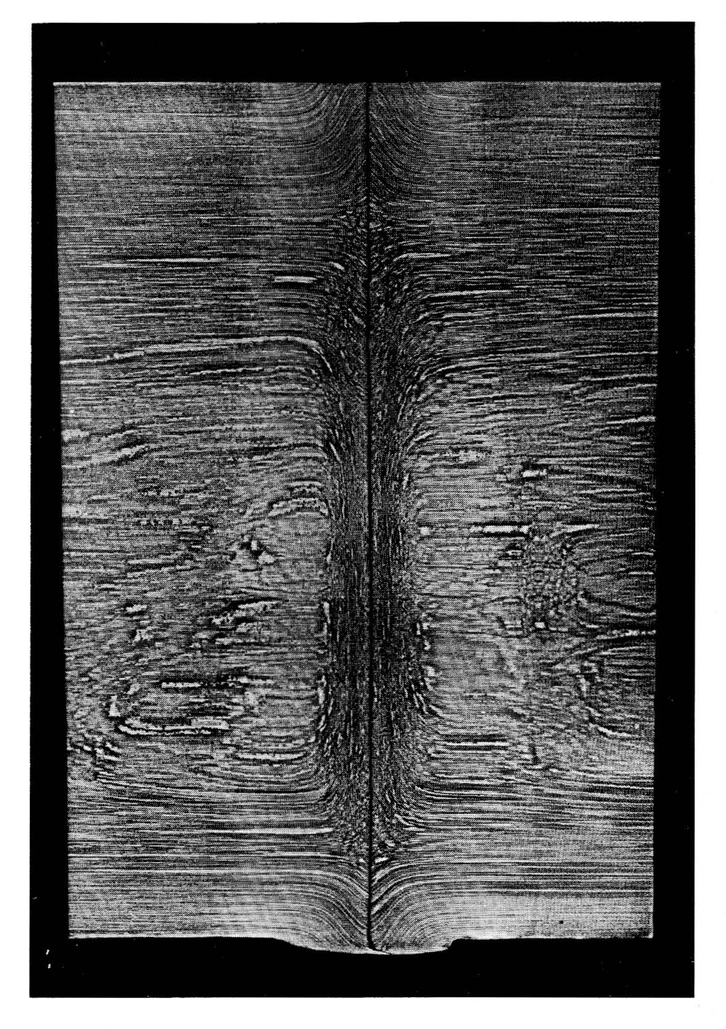


Fig. 125. — *Macrographie d'une soudure par étincelage*

La zone affectée par la chaleur (30 à 60 mm) est d'autant plus large et irrégulière que le nombre d'accostages, donc le préchauffage est plus important. La meilleure régularité est obtenue dans les soudeuses à induction. L'accroissement de dureté de la zone transformée est d'environ 30 à 35 HB et l'adoucissement dans les zones de transition de 10 à 15 HB ; dans le cas de la soudeuse à induction, on obtient respectivement 50 à 60 et 0 à 5 HB. Les résistances à la traction de la soudure et du métal de base sont pratiquement équivalentes.

Les principaux défauts proviennent de mauvaises exécutions conduisant à des amorces de fissures et à l'emprisonnement de métal en fusion ou de particules d'oxyde dans la ligne de soudure. Un chauffage irrégulier peut entraîner de tels défauts en empêchant à l'étincelage l'expulsion d'une partie du métal en fusion. Mais le défaut le plus courant dans la soudure par étincelage est constitué par la formation de "lunules" de forme généralement lenticulaire et de quelques dizaines de mm de dimension. Ces lunules dont l'origine est mal expliquée semblent constituées par des cratères insuffisamment comblés au moment du refoulement ou par des gouttes de métal restées liquides au cours du refoulement et qui cristallisent ensuite avec une structure dendritique. Elles ne présentent cependant aucun caractère de gravité et leur apparition est liée au niveau de la tension secondaire de la soudeuse qu'il y a intérêt à rendre la plus basse possible. Plus nocives sont les inclusions d'oxyde dues à un mauvais refoulement ou les cavités résultant d'explosions trop fortes au cours de l'étincelage et pouvant éventuellement avoir été ultérieurement remplies en totalité ou en partie par du métal liquide.

La plupart de ces défauts (lunules exceptées) peuvent dégénérer en fissures puis en ruptures.

Ces défauts sont cependant rares sur les soudeuses modernes. Le perfectionnement du circuit secondaire sur les machines Matix a permis de baisser la tension secondaire et les risques de lunules sont très réduits, sinon exceptionnels. Elles sont en général la conséquence d'un mauvais réglage des paramètres. D'autre part, les taches grises (désignées également "mates" ou "flat spots" suivant les auteurs) qui apparaissent dans les soudures exécutées par la méthode de préchauffage et étincelage ainsi que dans ses dérivés, n'ont pas encore été constatées dans les joints chauffés par induction.

Ces taches dues à l'hétérogénéité de l'acier ou à la présence de silicates sont surtout fonction de la nuance de l'acier et des paramètres de soudage utilisés. Une surchauffe peut produire une brûlure au patin, un mauvais ébavurage une amorce de fissure (parfois au congé âme champignon ou au patin), des efforts anormaux sur la ligne de soudure à des déchirures, amorces de fissures.

Il convient enfin de prendre en usine toutes précautions pour ne pas imposer à la soudure des contraintes anormales avant refroidissement suffisant. C'est ainsi qu'on a pu observer de nombreuses fissurations ou ruptures sur des soudures soumises à un ébavurage dit "dynami-

que'' dans lequel la soudure encore chaude était soumise à une traction et non à une compression.

La cadence de soudure est de l'ordre de 15 à 20 soudures à l'heure.

3.5.3. Caractéristiques générales des soudeuses par étincelage

3.5.3.1. Les premières machines qui datent de 1930 ont été construites à col de cygne, c'est-à-dire ouvertes vers l'avant. Vers 1950, sont apparues les machines de type ''tunnel'' par fermeture du ''col de cygne'' à l'avant de la machine avec comme conséquence un allègement du poids.

3.5.3.2. Évolution mécanique

L'évolution s'est alors faite selon 3 directions principales en ce qui concerne la partie mécanique :

- augmentation de la production,
- précision de l'alignement,
- automatisme.

La production a augmenté lorsque l'alignement des rails a été réalisé dans le plan vertical et dans le plan horizontal, c'est-à-dire au moyen d'un chariot mobile commandé mécaniquement ou hydrauliquement dans les deux plans orthogonaux, la partie supérieure et une des faces latérales du champignon pouvant être utilisées pour un alignement automatique des abouts.

Dans le cas de rails vrillés, on utilise deux systèmes pour aligner les champignons et les patins des abouts à souder :

- serrage sur l'âme du moyen de mors au profil du rail,
- serrage du patin par une fourchette mobile pour faire tourner l'âme après serrage latéral du champignon.

L'augmentation de la précision d'alignement des rails avant soudage a diminué considérablement les opérations qui suivent le soudage : redressage et rectification par meulage.

Les régulations d'avance, de vitesse et de pression sont maintenant entièrement automatiques grâce à l'emploi d'armoires programmables. L'opérateur de la machine n'a pratiquement plus qu'une fonction de surveillance et de contrôle des paramètres enregistrés.

3.5.3.3. Alimentation

On peut faire choix de divers types de courant pour l'alimentation de la soudeuse proprement dite : les fréquences utilisées inférieures ou égales à 50 ou 60 Hz n'ont qu'une incidence négligeable sur la répartition des lignes de courant. L'intérêt de l'utilisation directe du courant industriel est de limiter l'alimentation de la machine à un transformateur monophasé à faibles pertes. Ce type de courant ne présente généralement aucun inconvénient dans les pays industriels dotés d'un réseau électrique maillé. Au cas où l'on peut craindre des déséquilibres de phases, il convient d'alimenter la soudeuse en courant continu par l'intermédiaire d'un transformateur redresseur triphasé mais qui entraîne des pertes relativement importantes d'où l'intérêt chaque fois que possible d'utiliser le courant industriel.

Dans ce cas on utilise deux transformateurs du type hexaphasé (primaire triangle, secondaire étoile). Le courant secondaire a une ondulation pratiquement nulle et on peut considérer l'alimentation du circuit de soudage comme continue.

Avec ce type d'alimentation, on peut considérer que les 3 phases sont équilibrées.

La puissance totale appelée reste cependant du même ordre de grandeur que pour les machines modernes alimentées en monophasé, à cause de la chute de tension relativement élevée dans les redresseurs.

Il faut cependant signaler que l'emploi du courant continu limite la puissance disponible pendant l'étincelage du fait de l'absence de résistance et qu'il est donc nécessaire que la tension d'étincelage soit plus élevée que la tension d'accostage et de refoulement. Néanmoins, la tension continue d'étincelage reste plus basse qu'une tension alternative.

3.5.3.4. Circuit secondaire

Compte tenu des très fortes intensités en jeu dans la boucle de soudage constituée par le secondaire des transformateurs, les conducteurs et les rails à souder, le courant passe avec une densité bien plus grande dans la partie intérieure de la boucle que dans sa partie externe (loi du flux maximal) (fig. 126). Il peut en résulter des chauffes en V dans la phase de préchauffage et il faut donc égaliser la répartition de la chaleur pendant l'étincelage.

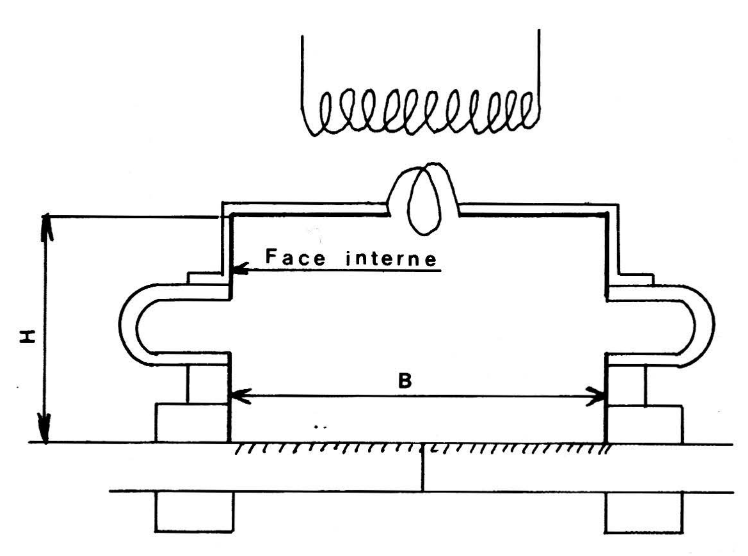


Fig. 126. — *Schéma de principe d'une soudeuse par étincelage*

La figure 126 représente le schéma des premières machines à souder les rails dont l'impédance de court-circuit était de l'ordre de 200 à 300 $\mu\Omega$.

Pour avoir l'intensité nécessaire de 45 000 A, la f.e.m. était de 9 à 14 V et la puissance de 400 à 630 kVA.

Dans ce type de machines, la répartition du courant n'était pas très bonne ; d'autre part il convient d'avoir la f.e.m. la plus basse possible pendant l'étincelage pour réduire la profondeur des cratères, mais il importe qu'elle reste compatible avec la stabilité du processus.

Pour réduire la puissance sans diminuer le courant utile, il faut abaisser l'impédance extérieure de court-circuit, qui est déterminée par

— la longueur et l'écartement des amenées de courant,
— la section des conducteurs des amenées de courant,
— le nombre de contacts intermédiaires.

On n'a guère d'action sur les deux derniers paramètres. Reste donc la longueur et l'écartement des conducteurs qui ne peuvent être réduits sans nuire à la protection des transformateurs et des amenées de courant contre les projections de métal fondu dans le cas où l'on garde le transformateur à l'arrière de la machine.

Il est par contre possible de diminuer l'impédance de moitié en disposant 2 transformateurs à 180° avec leur circuit secondaire en parallèle comme le montre la figure 127.

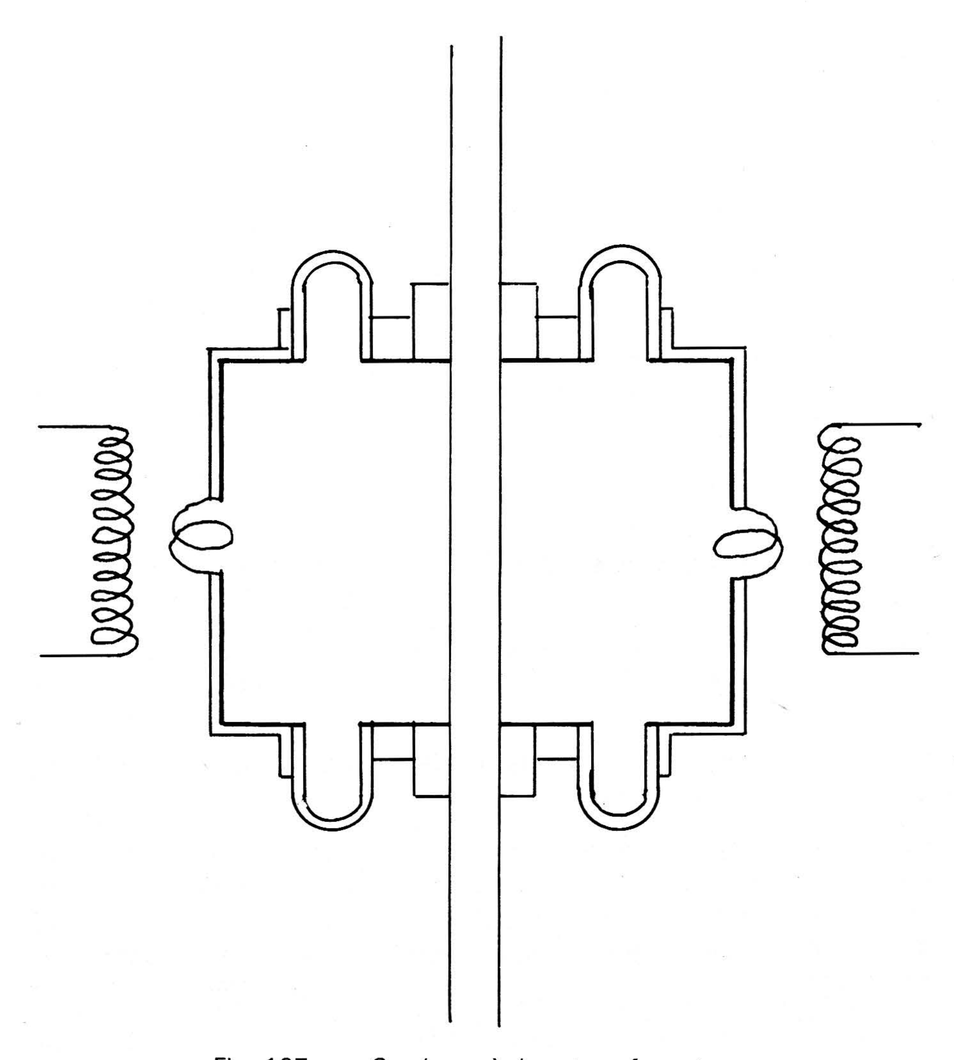


Fig. 127. — *Soudeuse à deux transformateurs*

En fait le transformateur de soudage fonctionne rarement à vide et son échauffement n'est fonction que du courant qui passe en charge dans son bobinage, le courant n'étant limité que par l'impédance secondaire très faible qui est composée de l'impédance propre de la machine et de celle des pièces à souder (fig. 128).

On définit comme puissance conventionnelle P_c celle qui correspond au passage du courant pendant la moitié du temps, soit T

I_c le courant passant pendant le temps T
Z l'impédance secondaire.

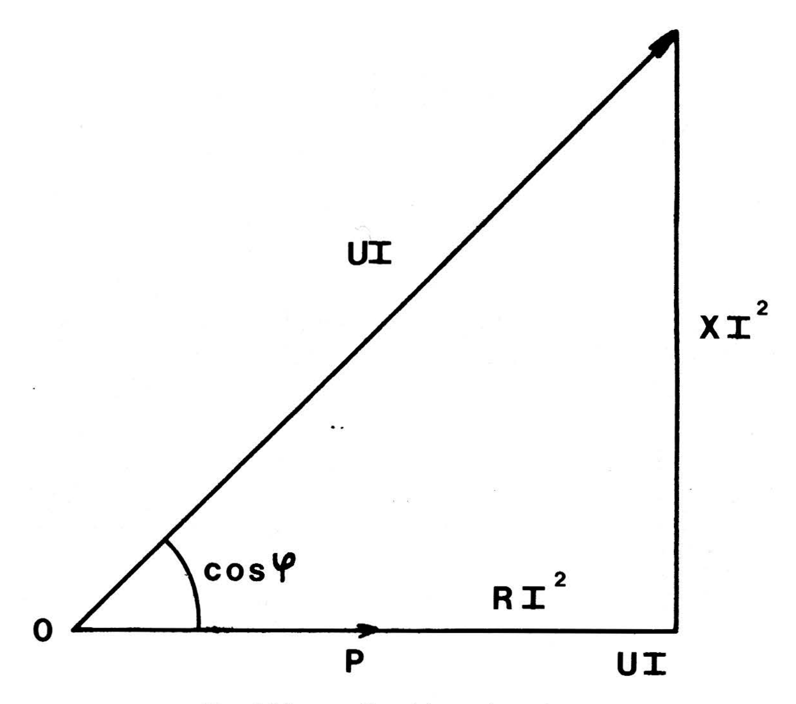


Fig. 128. — *Graphique de puissance*

L'échauffement est proportionnel à $ZI^2 T = Zi^2 t$

d'où $I_c = i \sqrt{\frac{t}{T}} = i \sqrt{\frac{t}{0,5}}$

En fonction du temps de travail réel, P_a étant la puissance apparente, on a $P_a = Zi^2 = Ui$ et $P_c = ZI_c^2 = UI_c$.

Donc $P_a = P_c \frac{i}{I_c} = P_c \sqrt{\frac{0,5}{t}}$ ou $t = 0,50 \left(\frac{P_c}{P_a}\right)^2$

Ces relations permettent de déterminer le temps limite d'utilisation, compte tenu bien sûr d'un éventuel postchauffage, donc le rendement horaire de la soudeuse en fonction de la puissance conventionnelle donnée par le fabricant.

Conçue selon cette technique (fig. 129), la machine Matix, type 304-TI, possède 4 transformateurs, 2 sous les électrodes de serrage du patin et 2 sur les électrodes de serrage du champignon. Cette machine a une impédance inférieure à 100 $\mu\Omega$ et pour souder des rails de 60 kg/m la f.e.m. est de 4,8 V, la puissance maximale inférieure

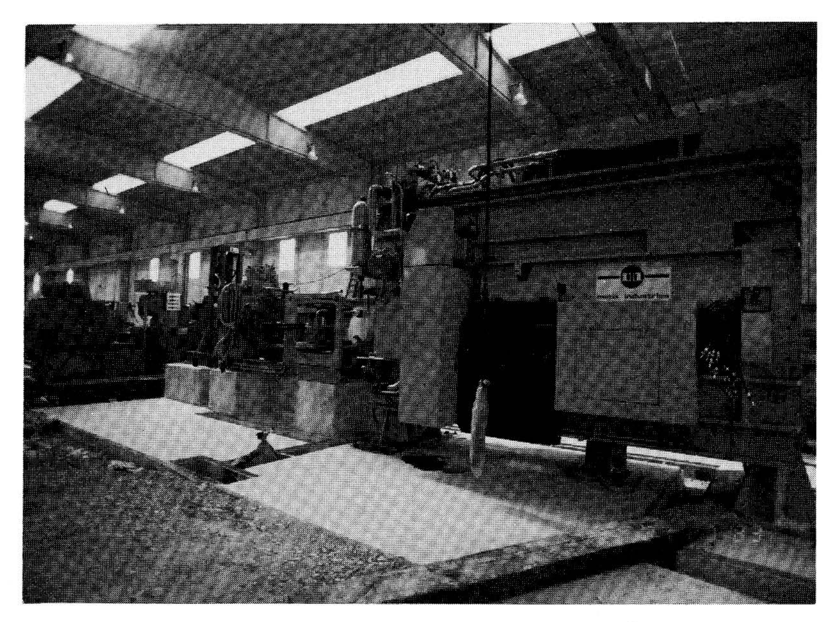


Fig. 129. — *Soudeuse MATIX 304-TS*

à 300 kVA, l'intensité secondaire supérieure à 50 000 A. Avec une f.e.m. supérieure, cette machine est capable de souder des rails de 70 kg/m pour une puissance de l'ordre de 350 kVA.

Cette disposition n'est pas unique et l'on peut très bien réaliser des machines avec deux transformateurs disposés latéralement avec amenée de courant sur l'âme des rails : c'est la solution adoptée sur les soudeuses électriques en voie Electromatix.

Dans le cas d'une alimentation en courant continu, la réactance n'entre en ligne de compte qu'à l'enclenchement et à la coupure des contacts et n'a pas les mêmes inconvénients qu'en 50 Hz. Par contre, la faible résistance de court-circuit peut nuire à la stabilité de l'étincelage à cause des fortes variations de la résistance des points de contact.

3.5.3.5. Influence des divers paramètres sur la qualité des soudures

Le processus de soudage est représenté par la figure 123.

Préchauffage.

Le préchauffage favorise le départ en étincelage et réduit le temps de soudage. Les paramètres du préchauffage sont les suivants :

— vitesse d'avance pour les accostages,
— vitesse de recul pour les accostages,
— efforts pendant les accostages,
— durée des contacts d'accostage
— temps entre rupture du contact et nouveau contact
— nombre des accostages
— tension pendant les accostages.

a. *Vitesse d'avance pour les accostages*

Cette vitesse doit d'une part être suffisamment élevée pour que l'étincelage ne démarre pas pendant la phase de préchauffage et suffisamment basse pour favoriser des amorces d'étincelage en vue d'égaliser les surfaces des contacts des abouts des rails et d'obtenir une bonne répartition de la chaleur. Une vitesse d'avance de l'ordre de 2 mm par seconde est satisfaisante mais doit être ajustée sur chaque machine et quelquefois pour chaque type de rail.

b. *Vitesse de recul pour les accostages*

Cette vitesse est sensiblement du même ordre de grandeur que la vitesse d'avance. Une vitesse trop lente augmente le temps de soudage et une vitesse trop rapide diminue l'égalisation possible des abouts par étincelage à la rupture du contact.

c. *Effort pendant les accostages*

C'est la résistance de contact entre les abouts de rails à souder qui provoque leur échauffement pendant la phase de préchauffage. Cette résistance, fonction de l'effort d'accostage est donc particulièrement importante pour régler la profondeur de chauffe.

Un grand effort de contact augmente la profondeur de chauffe et diminue le gradient de température. Un faible effort provoque un chauffage superficiel et augmente le gradient de température. Un calcul simple montre que la puissance disponible pour le préchauffage du joint en fonction de la tension secondaire est

$$P = I \sqrt{U^2 - X^2I^2} - RI^2$$

Cette fonction est représentée par la figure 130.

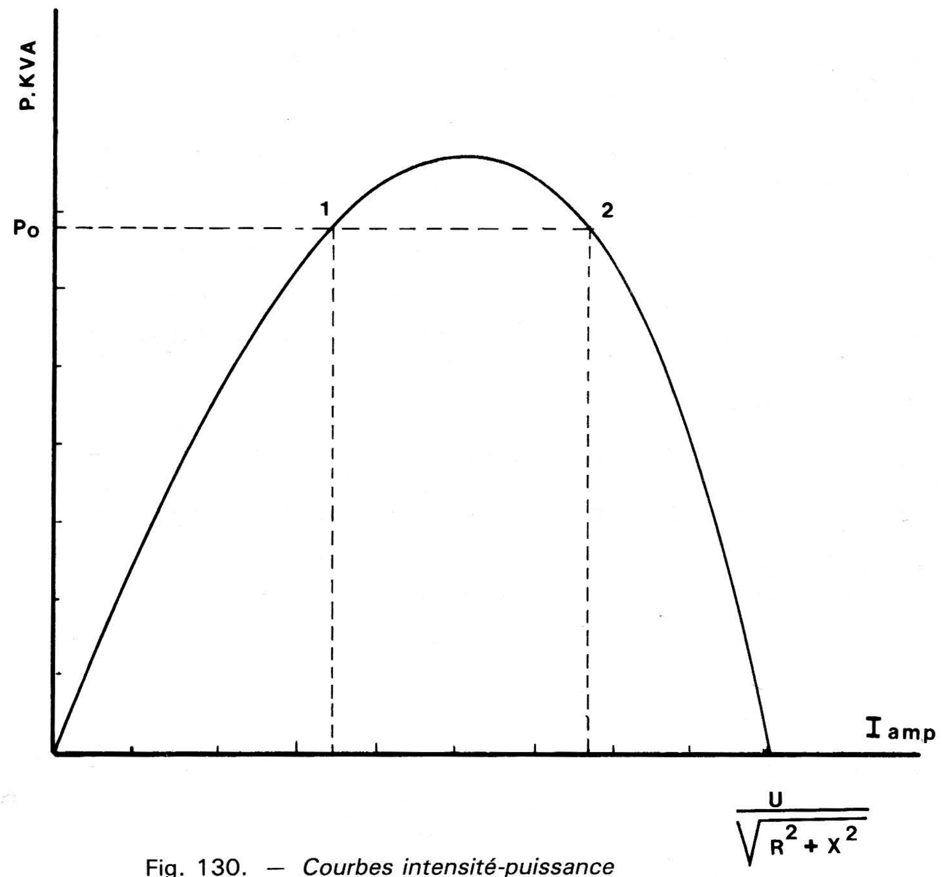


Fig. 130. — *Courbes intensité-puissance*

Cette puissance est maximale quand la résistance de contact est égale à $R = \sqrt{Z^2 - X^2}$ et que le courant est égal à $\sqrt{\frac{U^2 (Z - R)}{2 ZX^2}}$

R = résistance de court-circuit de la machine, y compris la résistance des pièces à souder.
X = réactance de court-circuit de la machine.
Z = impédance de la machine en court-circuit.
U = tension secondaire à vide de la machine.

Il est bien entendu que pour avoir une certaine profondeur de chauffe, la résistance de contact pendant le préchauffage devra être inférieure à $\sqrt{Z^2 - X^2}$.

Il convient de remarquer que l'étincelage n'est stable que si l'intensité augmentant la puissance augmente également. On n'est donc en régime stable que dans la partie gauche de la courbe de la figure 130.

Le point 1 est un point de fonctionnement stable. Si l'intensité augmente, la puissance dissipée dans les points de contact augmente, tandis que pour le point 2 la puissance diminue et on aboutit à l'intensité de court-circuit.

La stabilité de l'étincelage peut être évaluée par la dérivée $\frac{dP}{dI}$ ainsi que par la distance des points 1 et 2 qui définit la marge maximale d'élévation d'intensité.

Si l'on fait la même analyse avec une machine dans laquelle la tension secondaire est continue, la puissance disponible pour l'étincelage est :

$$P = UI - RI^2$$

On en déduit

$$I_{max} = \frac{U}{2R}$$

avec une résistance de contact égale à R.

La courbe $P = UI - RI^2$ (figure 131) est bien plus aplatie pour un même courant de court-circuit que la courbe d'une machine avec tension alternative et la même résistance de court-circuit mais dans laquelle la réactance n'est pas nulle. On voit bien que la puissance disponible pour l'étincelage est beaucoup plus petite.

d. *Durée des contacts d'accostage*

Plus le temps de passage du courant pendant les accostages est long, plus la profondeur de chauffe est grande, plus le gradient de température est faible et inversement. En général, le temps d'accostage est de l'ordre de 2 secondes avec un maximum de 4 secondes.

e. *Temps entre rupture du contact et nouveau contact*

Ce temps permet l'égalisation de la chaleur dans les abouts de rails. Si l'effort de contact est bien réglé et le temps de contact des accostages adéquat, ce temps peut être réduit au minimum, l'inertie des

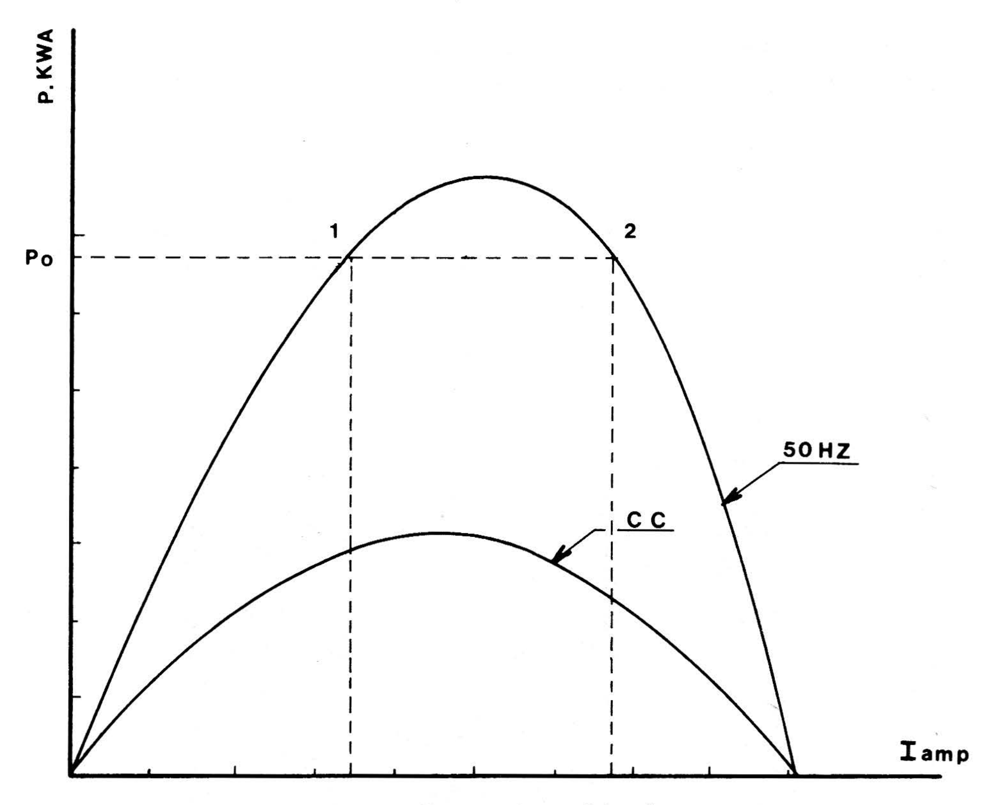


Fig. 131. — *Courbes intensité-puissance*

pièces en mouvement étant suffisante pour pouvoir inverser le mouvement du chariot dès que le courant ne passe plus dans les rails.

f. *Nombre des accostages*

Le nombre des accostages est fonction de la température des abouts qui doit être suffisante pour démarrer l'étincelage. Si l'effort d'accostage est faible et le temps d'accostage pas trop long, le nombre d'accostages peut se limiter à 6 approches, mais d'une façon générale pour avoir une bonne répartition de la chaleur quel que soit l'état de surface et de parallélisme des abouts de 12 à 14 approches sont souhaitables.

g. *Tension pendant les accostages*

Cette tension est la même que celle utilisée pendant le refoulement permettant de débiter de 5,5 à 6 Amp/mm², la machine étant en court-circuit avec les pièces à souder. Avec une tension trop élevée (10 V),

le contact se détruit quand sa surface est encore très petite et la quantité de chaleur transmise diminue quand la tension augmente.

3.5.3.6. Étincelage

L'étincelage (fig. 132) est provoqué par l'éclatement des contacts élémentaires des abouts des rails quand la vitesse d'avance est suffisamment basse pour que ces contacts aient le temps d'éclater avant que leur nombre ne soit trop important et leur résistance totale trop faible.

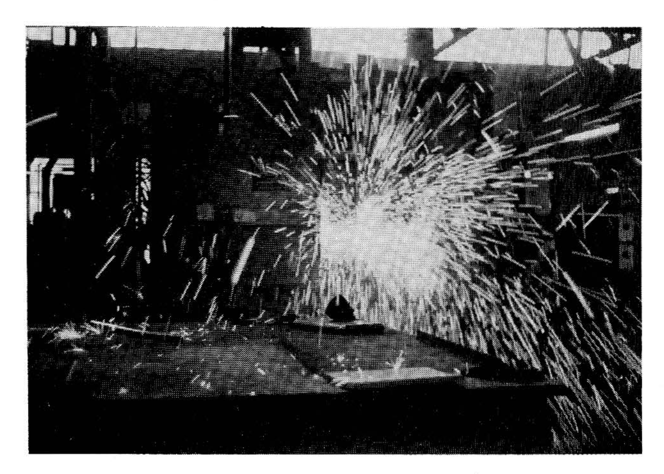


Fig. 132. — *Phase d'étincelage*

Normalement, la résistance de chaque contact élémentaire et la densité du courant le traversant sont très élevées. C'est pourquoi le métal fond rapidement aux points de contact et éclate avant même que leurs surfaces n'aient le temps de s'agrandir par rapprochement des abouts. Après l'éclatement, il apparaît un petit cratère à la base du contact.

A tout moment, la surface totale des contacts est beaucoup plus petite que celle de la section des pièces à souder.

Le phénomène d'éclatement des contacts fonction des forces électrodynamiques conjuguées avec les lois de la mécanique des fluides est très complexe. On suppose que lorqu'un contact élémentaire est traversé par un fort courant, sa partie centrale est portée à ébullition avant sa périphérie d'où éclatement lorsque la pression interne dépasse la résistance mécanique de la périphérie.

Quand les abouts sont à une température proche de la fusion, la surface des contacts augmente, leur résistance ohmique diminue et à l'éclatement un volume de métal liquide plus important est éjecté. La durée des contacts est alors plus courte, l'apport de chaleur étant plus faible.

3.5.3.7. Tension secondaire à vide pendant l'étincelage

L'expérience montre que la profondeur des cratères est d'autant plus faible que la tension est basse. Pour diminuer les risques d'avoir des cratères qui subsistent après refoulement donc des lunules, on a intérêt à conduire la phase d'étincelage avec la plus petite f.e.m. possible compatible avec la stabilité de l'étincelage.

D'autre part, avec une grande f.e.m. la durée des contacts est plus courte et le gradient de température élevé. La profondeur de chauffe est faible et la stabilité de l'étincelage est plus difficile à maintenir. Par contre, avec une faible f.e.m. la profondeur de chauffe est plus importante et l'énergie consommée est plus grande.

Suivant l'effort exercé pendant la période de préchauffage et donc la profondeur de chauffe, la vitesse d'étincelage est différente. Pour une même énergie de préchauffage, elle varie en sens inverse de la profondeur de chauffe.

La vitesse avant refoulement doit être comprise entre 0,8 mm/sec et 1,5 mm/sec. Pour des vitesses inférieures à 0,8 mm/sec et supérieures à 1,5 mm/sec, les soudures n'ont plus une qualité acceptable ; en particulier une trop grande vitesse finale d'étincelage augmente la profondeur des cratères et entraîne l'apparition de défauts. Les systèmes de régulation de la vitesse d'étincelage doivent être basés sur le fait que jamais le courant ne doit dépasser le maximum de puissance autorisé pour l'étincelage (fig. 130).

La courbe idéale des vitesses correspond à un démarrage de l'étincelage à une vitesse relativement basse assurant un bon échauffement des abouts. Cette vitesse régulée pour éviter les court-circuits doit rester constante ou avoir une faible accélération jusqu'à ce que l'étincelage soit stable. On peut alors provoquer l'accélération de la vitesse jusqu'à la valeur finale indiquée plus haut suivant une courbe parabolique ou exponentielle de façon à augmenter la consommation de métal par unité de temps.

Dans le cas de préchauffage, l'intensité minimale pour l'étincelage est de l'ordre de 2 à 2,5 Amm^2 et la résistance de l'espace d'étince-

lage pour les rails courants de l'ordre de 200 à 220 $\mu\Omega$, ce qui donne une puissance d'étincelage minimale $P = p\ S^2D^210^{-6}$.

La f.e.m. sera donc $U = (p + R)\ SD.10^{-6}$ et la puissance mesurée

$P = (p + R)\ (SD)^2.10^{-6}$
p = résistance en microhms dans l'espace d'étincelage
S = section du rail à souder
D = densité de courant pendant l'étincelage
R = résistance de la machine en court-circuit, rail à souder compris.

Certaines machines possèdent une régulation de tension pendant l'étincelage, mais ce système ne semble pas indispensable dans la mesure où la régulation de vitesse est bien asservie au courant secondaire.

3.5.3.8. Vitesse d'étincelage

Dans le cas d'un préchauffage, la température dans les abouts est telle qu'au début de l'étincelage l'équilibre thermique est presque atteint. La phase d'étincelage augmente le gradient de température, mais la quantité de chaleur amenée est faible. Le gradient de température augmente avec la vitesse d'avance. La régulation de vitesse est à boucle fermée, c'est-à-dire que l'on doit déterminer avant soudage le programme des vitesses et le contrôle du courant réagissant sur ce programme.

Le système de commande à vitesse variable peut être hydraulique ou commandé mécaniquement par le déplacement du chariot. Dans ce dernier cas, la variation de vitesse est programmée d'avance en fonction du déplacement du chariot et n'est modifiée que pour une augmentation intempestive du courant secondaire qui arrête la vitesse d'avance pendant un temps très court correspondant au temps d'éclatement des contacts.

Une autre solution consiste à commander la vitesse du chariot en fonction du courant moyen nécessaire pour l'étincelage. Dans ce cas, l'avance du chariot est hydraulique, mais pilotée électriquement ou électroniquement. On a alors une autorégulation de vitesse en fonction du courant.

3.5.3.9. Refoulement ou forgeage

Le forgeage (fig. 125) a une grande influence sur les caractéristiques mécaniques des soudures. Pendant le refoulement s'effectue l'expulsion du métal liquide et des oxydes, ainsi que la recristallisation du

métal dans la ligne de soudure. L'effort de forgeage est compris entre 4 et 5 kg/mm² pour le soudage avec préchauffage.

En cas de commande hydraulique (ce qui est généralement le cas), la vitesse de forgeage ne doit pas être limitée par le débit des pompes et l'emploi d'un accumulateur hydraulique est indispensable.

La longueur de refoulement, fonction de la profondeur de chauffe est de l'ordre de 8 à 12 mm. On a constaté expérimentalement qu'avec

— un refoulement inférieur à 8 mm, les soudures présentent des défauts notamment des zones non soudées qui sont vraisemblablement des cratères non comblés,
— une longueur de refoulement trop importante, la déformation trop prononcée des fibres du métal diminue la résilience.

Il faut enfin noter que le courant ne doit jamais être coupé avant le début du refoulement, mais seulement 0,5 à 4 secondes après celui-ci suivant la qualité de l'acier des rails.

3.5.3.10. Post-chauffage sur les machines à souder par résistance

Dans une soudeuse par résistance, on ne peut localiser avec précision la zone à chauffer.

Le courant de post-chauffage passe dans la longueur du rail comprise entre les électrodes. La résistance de cette portion de rail n'est pas homogène, car elle est fonction de la température en chaque point du rail. Tout de suite après soudage, le post-chauffage est localisé à l'endroit de la zone de la soudure, mais avec le refroidissement progressif de cette zone le post-chauffage agit sur une zone plus grande.

Il serait donc préférable d'employer le terme ''refroidissement contrôlé'' au lieu de post-chauffage.

Sur les machines à souder par résistance, le refroidissement contrôlé s'effectue par impulsions de courant suivies d'un refroidissement après chaque impulsion. De cette façon, on arrive à maîtriser la vitesse de refroidissement dans une large mesure, mais ceci peut ne pas convenir pour certaines qualités d'acier.

Dans le cas de post-chauffage, il faut aussi faire attention à ne pas dépasser la puissance possible des transformateurs et l'échauffement général admissible de la soudeuse.

3.5.4. *Conception générale de soudeuses*

Dans l'ensemble, les soudeuses que l'on trouve sur le marché répondent à la plupart des conditions énumérées ci-dessus. Nous donnerons à titre d'exemple une très brève description de l'une des plus modernes, la soudeuse 453 CC de Matix Industries, perfectionnement de la 304 T du même constructeur (fig. 133) en ce sens qu'elle utilise le courant continu et comporte un ébavurage incorporé.

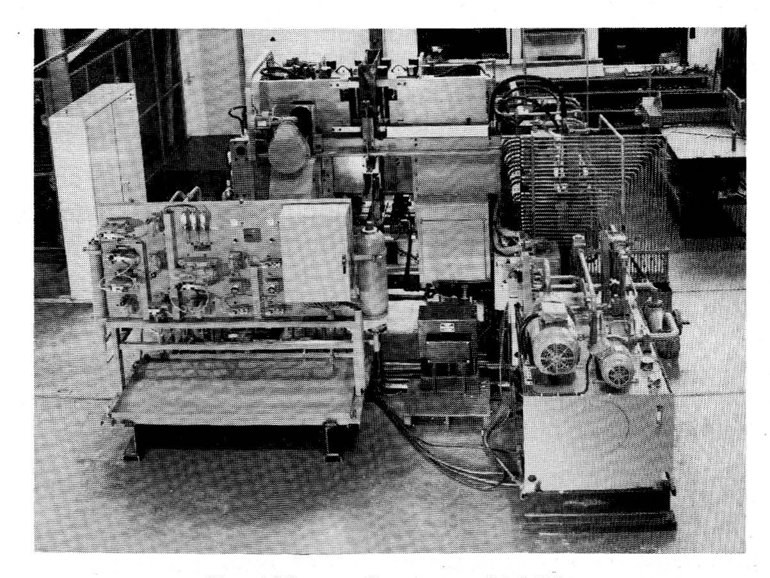


Fig. 133. — *Soudeuse 304-TS*

Les principales caractéristiques sont les suivantes :

puissance : 300 kVA
capacité de soudage : 10 000 mm^2
production horaire : 25 soudures
durée d'un cycle : 60 à 120 secondes
pression de refoulement maxi : 766 kN
serrage des mâchoires : 1 000 kN
course du chariot : 40 mm
masse : 20 t
puissance d'ébavurage : 132 t
course d'ébavurage : 80 mm
intensité : 60 000 Amp avec 60 $\mu\Omega$
intensité d'étincelage : 25 000 Amp avec 220 $\mu\Omega$.

La machine est constituée par un bâti mécanosoudé sur lequel sont fixées des C de serrage réglables à l'aide de vérins hydrauliques et du vérin de dévrillage. Les électrodes en alliage de cuivre assurent en même temps le serrage. Du côté mobile, elles sont reliées à deux transformateurs redresseurs hexaphasés, l'ensemble étant refroidi par eau ; le côté fixe a des tresses refroidies par ventilation forcée. A la fin du refoulement, la pression étant maintenue, on procède à l'ébavurage du champignon et du patin puis de l'âme, le couteau étant porté par le chariot mobile.

La soudeuse est équipée d'une centrale hydraulique à huile, d'un système de commande électrique et électronique et d'un enregistreur des paramètres de soudage. L'ensemble des réglages de position des rails et de commande des cycles est entièrement automatique.

La soudeuse peut souder avec ou sans préchauffage par commande directe. Enfin, sans modification de principe, cette machine peut être alimentée en courant alternatif au secondaire par 4 transformateurs placés dans l'espace réservé au passage des tresses, les transfos étant identiques à ceux de la soudeuse 304 T.

Elle peut aussi éventuellement souder par impulsion, le chariot de refoulement ayant été étudié pour avoir la masse la plus faible possible compatible avec les efforts induits par cette méthode.

La décomposition des diverses opérations élémentaires est la suivante : une fois le rail à souder en place dans la machine :

1. affaissement des rouleaux et serrage vertical
2. recul du chariot de refoulement de 0,5 mm
3. alignement des rails
4. bridage du chariot et réglage
5. cycle de soudage
6. avance des outils d'ébavurage du champignon et du patin
7. avance des outils d'ébavurage de l'âme puis recul
8. desserrage général et montée des rouleaux

3.5.5. En général implantée dans des usines fixes les soudeuses et leurs équipements accessoires peuvent être rendus semi-mobiles en les installant sur un train déplaçable en fonction des besoins, en divers postes fixes ; c'est en particulier le cas aux USA où la faible importance de certains réseaux ne justifie pas l'acquisition d'une usine clefs en main, mais la simple location d'un groupe de soudage semi-mobile.

3.6. *Soudage par induction*

Le soudage par induction consiste à porter les extrémités des rails à souder à la température du « blanc soudant » à l'aide d'un inducteur alimenté par un courant alternatif de fréquence appropriée, puis à refouler un des deux rails sur l'autre. Contrairement au soudage par étincelage, il faut éviter d'atteindre la température du liquidus, la chute des gouttes formées pouvant endommager l'inducteur. Le soudage par induction exige de ce fait des surfaces d'accostage aussi propres (absence d'oxydes, de graisse), aussi planes (tolérance sur le parallélisme 0,02/300 mm) et aussi peu rugueuses que possible (RU = 1,6 – 0,2 μ). Ceci impose de dresser les surfaces à souder sur la machine elle-même, ce qui dispense de souder sous atmosphère, le bon contact empêchant toute pénétration d'air entre les abouts de rails.

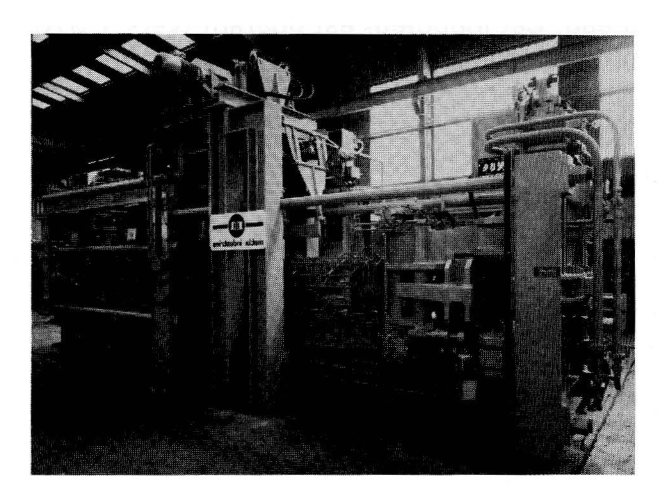


Fig. 134. — *Soudeuse à induction*

Le prototype (fig. 134) construit par Matix Industries et qui fonctionne dans d'excellentes conditions depuis 1980, comprend outre les installations hydrauliques et électroniques, les installations de commande et de contrôle et un transformateur d'alimentation 15 000/380 V de 630 kVA, les éléments spécifiques suivants :

- un chariot assurant les mouvements longitudinaux et le refoulement lors du forgeage,

— une partie centrale comportant une unité de fraisage à deux têtes parallèles à pastilles carbure assurant un parfait parallélisme des deux faces à souder, ainsi que le mécanisme assurant la mobilité de l'inducteur,
— un chariot assurant la mise en coïncidence des sections à souder par des mouvements verticaux et transversaux, les rails étant ensuite dévrillés et maintenus en place par des vérins de serrage,
— un inducteur ouvrant dont la fermeture ne s'effectue que pour l'opération de chauffage des rails. Cet inducteur est évacué en partie haute de la machine lors des autres opérations. Cet organe qui est l'une des pièces maîtresses de la machine joue un double rôle : alimenté, avec un courant de fréquence 3 000 Hz, d'une part il assure un échauffement homogène de la face terminale des rails à souder, d'autre part, il permet une répartition correcte des températures le long des abouts à assember.

L'inducteur, de courte longueur est réalisé en tube de cuivre de section carrée monté sur un matériau isolant refroidi en permanence par circulation d'eau. Cet inducteur est ouvrant (vers 1 370°) pour éviter tout contact avec le bourrelet au moment du forgeage (pression de 5 kg/mm²). Il est protégé par des anneaux pour limiter les pertes magnétiques. Bien entendu à chaque profil de rail correspond un inducteur approprié. Parmi les principaux avantages de ce type de soudures, on peut citer la parfaite qualité géométrique (0,3 mm sur règle de 1,70 m) du fait de l'absence de mouvements d'accostage, une excellente régularité de chauffe et la facilité des traitements de post-chauffage. Par exemple, on peut après soudure et 4 à 5 minutes d'interruption réchauffer sans difficulté la soudure en 4 minutes vers 850°. Cette soudeuse est donc finalement bien adaptée aux soudures de lignes à grande vitesse qui exigent un excellent dressage et à celles de rails alliés à hautes performances.

3.7. Soudage en voie

3.7.1. Le soudage en voie a été réalisé jusqu'à ces dernières années par différents procédés, les plus courants étant l'aluminothermie et le soudage par effet Joule (étincelage continu, préchauffage et étincelage).

Les premières machines utilisées vers 1936 serraient le rail entre le patin et le champignon. Peu pratiques, elles nécessitaient l'enlève-

ment des traverses et le dégagement du ballast. Les commandes et le procédé de soudage étaient les mêmes que pour les soudeuses fixes.

Après 1950, les Soviétiques ont mis au point une soudeuse par étincelage continu qui serrait les rails sur âme. Le travail de préparation était fortement diminué et la production nettement améliorée.

Cette technique a été perfectionnée, mais le principe reste le même. La machine travaille sensiblement au niveau de la voie. Sur le marché on trouve maintenant des soudeuses de ce type qui soudent suivant les différents cycles connus (étincelage continu, pulsation et préchauffage et étincelage). Sur les machines récentes l'ébavurage est incorporé.

3.7.2. Nous donnerons quelques brèves indications sur la soudeuse de voir 302 T à ébavurage incorporé conçue par Matix Industries (fig. 135) qui répond aux exigences du cahier des charges SNCF. La tête de soudage est accrochée à un palonnier relié à un wagon support qui assure la fourniture de l'énergie électrique et hydraulique. Elle comporte deux paires de mâchoires de serrage, une fixe et une mobile solidarisées par un axe de guidage et des barres cylindriques qui assurent l'indispensable rigidité entre les deux mâchoires pendant l'opération de soudage. L'effort de serrage sur chaque about de rail est de 10^4 KN. Chaque rail est bridé verticalement avant serrage en vue d'obtenir un excellent alignement de la soudure. Les mâchoires fixes assurant l'amenée de courant forment une pince qui possède un transformateur dans chaque bras ; les outils d'ébavurage sont incorporés dans cette mâchoire fixe.

Pendant l'étincelage, le déplacement des mâchoires mobiles est commandé par un variateur hydraulique de vitesse suivant une loi exponentielle e^{at}, le coefficient a étant réglable dans une plage de vitesse de 0,1 à 2 mm/s.

La soudeuse d'une puissance de 480 KVA fonctionne en courant monophasé 50 Hz avec f.e.m. réglable de 4 à 9 volts et un courant secondaire maximal de 60 000 ampères.

Elle fonctionne de la façon suivante :

Les abouts des rails sont présentés jointifs et en ligne dans les plans horizontal et vertical. Deux références sur champignon pour chaque rail distantes d'environ 500 mm permettent le bridage des rails et leur alignement pour la soudure.

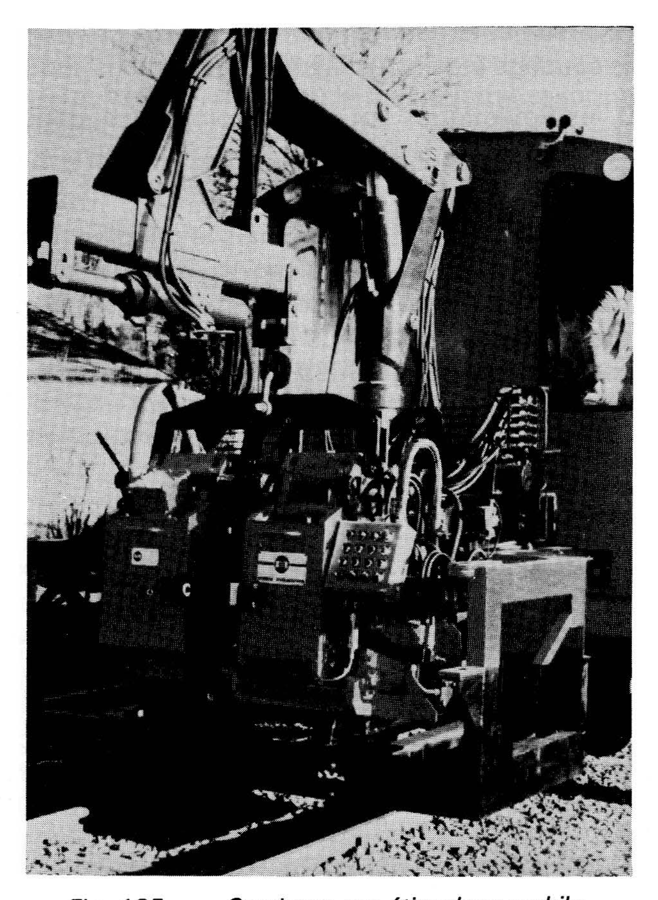


Fig. 135. — *Soudeuse par étincelage mobile*

On obtient ainsi une précision de 0,2 mm sur une règle de 1 m de longueur.

Les rails sont dégauchis automatiquement sur les références du champignon. La référence latérale est assurée du côté du roulement, l'autre côté pouvant compenser par un certain jeu les différences de tolérance d'épaisseur de l'âme.

Après bridage du patin et serrage des rails, on déclenche le soudage ''étincelage continu'' ou soudage avec préchauffage. Dans le cas où l'on soude avec préchauffage, l'effort de contact sur les abouts est le plus faible possible tout en restant compatible avec une bonne répartition de la chauffe. Le nombre d'accostages du préchauffage et les vitesses d'avance et de recul sont réglées séparément avant soudage.

La phase d'étincelage est déclenchée automatiquement par le changement de la vitesse d'avance des mâchoires mobiles. Dans le cas où la température des abouts ne permet pas le départ en étincelage, la machine déclenche automatiquement un ou plusieurs accostages supplémentaires.

La longueur d'étincelage ayant été préréglée, le refoulement est déclenché par changement de la pression de serrage et d'avance. L'effort de refoulement est maintenu pendant un temps préréglé ou jusqu'à la fin de l'ébavurage. A ce moment, les outils d'ébavurage avançent automatiquement, les deux rails restant bridés pendant l'ébavurage. Après retour à la position départ, la machine est prête pour un nouveau cycle. Si la machine possède un post-chauffage (maximum 6 min) celui-ci est déclenché automatiquement après retour des outils d'ébavurage et coupure de l'effort de refoulement. L'énergie électrique est généralement fournie par un groupe alimenté par moteur diesel : ce dernier doit être équipé d'un volant stabilisateur pour répondre aux variations brusques de charge qui interviennent pendant le préchauffage et le refoulement.

3.8. Soudure aluminothermique

L'aluminothermie ou méthode de GOLDSCHMIDT découverte en 1895 permet d'obtenir un métal par réduction d'un de ses oxydes par de l'aluminium.

Cette réaction amorcée à l'aide d'une source de chaleur à haute température (3 000° environ) est elle-même fortement exothermique et confère au bain une température qui dans le cas d'oxyde de fer peut être estimée comprise entre 2 000 et 2 500° C. C'est grâce à cette propriété qu'il est possible d'appliquer l'aluminothermie au soudage des rails. Initialement utilisée pour les rails de tramways, elle a été développée sur l'ensemble des réseaux ferroviaires essentiellement pour réaliser in situ la jonction de barres neuves ou la réparation de défauts ou ruptures par introduction de coupons.

Pour souder deux rails on coule dans un intervalle ménagé entre les deux abouts l'acier produit par la réduction d'un oxyde de fer. Il existe 3 oxydes de fer courants dont les réactions de réductions peuvent s'écrire :

$$3\ Fe\,O + 2\ Al \rightarrow 3\ Fe + Al_2\,O_3 + Q_1\ \text{K calories} \quad (1)$$
$$3\ Fe_3\,O_4 + 8\ Al \rightarrow 9\ Fe + 4\ Al_2\,O_3 + Q_2\ \text{K calories} \quad (2)$$
$$3\ Fe_2\,O_3 + 2\ Al \rightarrow 2\ Fe + Al_2\,O_3 + Q_3\ \text{K calories} \quad (3)$$

La quantité de chaleur libérée Q_3 provient de la différence entre la chaleur dégagée par l'oxydation d'une molécule d'aluminium (380 Kcal) et celle nécessaire à la réduction de l'oxyde de fer (198,5 Kcal) soit 181,5 Kcal. Q_2 est estimé à 719,5 Kcal. Différentes études tendent à montrer que c'est la réaction (3) qui produit le plus grand nombre de calories par gramme de libéré, mais la composition des charges de soudure est liée à la matière première disponible qui en général est un mélange des 3 oxydes $Fe\,O$, $Fe_2\,O_3$ et $Fe_3\,O_4$.

Les problèmes généraux de susceptibilité des aciers devant le choc thermique engendré par la soudure s'appliquent bien entendu à l'aluminothermie et il faut en particulier vérifier que la vitesse de refroidissement des soudures reste compatible avec les courbes en S relatives à chaque nuance d'acier, en particulier pour le franchissement de la plage 800-500° C.

Les réactions (1), (2), (3) montrent que le produit obtenu est du fer, mais pour tenir compte de la nuance d'acier à souder, on incorpore dans les charges des produits d'addition ad hoc sous forme de ferro-alliages.

Le tableau 24 donne un aperçu de la composition des charges de soudure utilisée en Angleterre en fonction de la nuance d'acier.

3.8.2. La soudure aluminothermique des rails a d'abord été utilisée sur les voies de tramway. Le bain aluminothermique coulé dans un moule placé autour du joint n'avait pour effet que de porter l'extrémité de chaque about à la température du "blanc soudant". Les rails en fer à l'époque étaient ensuite soudés par forgeage grâce à une pression exercée de part et d'autre.

L'augmentation de la teneur des rails en carbone créant un obstacle à ce procédé, on utilisa ensuite la soudure dite "à plaquette" (fig. 136).

Dans cette méthode, les patins sont enrobés dans le fer fondu qui remplit la partie inférieure d'un moule placé autour du joint. L'alumine plus légère entoure les champignons et grâce à sa température élevée (solidification à 1 800° C environ) les porte au "blanc soudant". Grâce à la décarburation partielle des deux abouts de rails au contact de la plaquette en acier doux, le soudage par forgeage est alors possible.

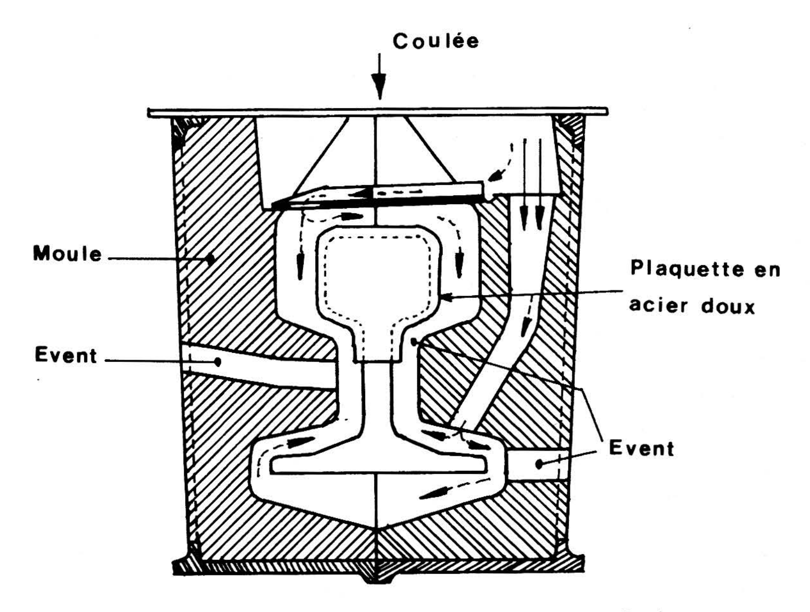


Fig. 136. — *Schéma de principe de la soudure à plaquette*

La première application en France du soudage des rails des voies de chemin de fer fut faite en 1906 par la Compagnie des Chemins de Fer du Nord.

Le procédé "à plaquette" compliqué et ne donnant pas entièrement satisfaction a été remplacé vers 1930 par les procédés actuels avec ou sans préchauffage.

3.8.3. Les procédés actuels de soudage sont des procédés de soudage par fusion avec métal d'apport. La liaison des rails est obtenue après solidification de l'acier coulé et des extrémités fondues sans forgeage des pièces.

Les procédés se distinguent par la façon dont la quantité de chaleur nécessaire à la fusion des abouts est obtenue.

Les calories peuvent être soit totalement prélevées sur le bain soit partiellement apportées par une source extérieure de chaleur.

Élément	BS II acier standard	Charge	Rail résistant à l'usure	Charge	Rail au Cr	Charge
C	0,45/0,60	0,45/0,65	0,65/0,78	0,45/0,65	0,68/0,78	0,60/0,80
Mn	0,95/1,25	0,7 /1,2	0,80/1,30	1,0 /1,5	0,90/1,20	1,0 /1,5
Si	0,05/0,35	0,4 max.	0,05/0,50	0,4 max.	0,5 max.	0,4 max.
S	0,05 max.	0,06 max.	0,05 max.	0,06 max.	0,04 max.	0,06 max.
P	0,05 max.	0,06 max.	0,05 max.	0,06 max.	0,03 max.	0,06 max.
Al		0,2 /0,7		0,2 /0,7		0,2 /0,7
Cr		0,2 max.		0,2 max	0,95/1,25	0,2 max.
V						0,2 max.
BHN	241-252	229-293	247-275	282-341	318-345	310-370
résistance traction en N/mm^2	710	800	880	900	1 080	1 080

TABLEAU 24

On distingue dans l'ordre chronologique d'application

— le procédé avec préchauffage,

— le procédé sans préchauffage,

— le procédé avec préchauffage limite.

Le préchauffage a pendant longtemps été effectué avec des flammes en particulier au propane. Depuis quelques années, s'est introduite la soudure sans préchauffage : dans ce dernier type, le volume de la charge de soudure est calculé pour assurer directement le chauffage des abouts (800° à 900°) ; une part de la charge sert au préchauffage, l'autre à la soudure proprement dite. On peut constater sur le schéma de la figure 137 qui montre comment sont réparties entre source extérieure et charge les quantités de chaleur nécessaires à la soudure que toutes les combinaisons sont possibles entre le préchauffage total au gaz et le préchauffage bref servant uniquement au séchage des moules (de 2 à 3 minutes). Il suffit de faire varier le volume de la charge : la charge de soudure sans préchauffage est sensiblement plus onéreuse, mais elle apporte un précieux gain de temps (15 minutes contre 30) ce qui est particulièrement appréciable sur les lignes à fort trafic. La soudure sans préchauffage s'est donc très largement substituée à la soudure avec préchauffage. Il existe également des charges à préchauffage réduit (de 2 à 5 minutes pour atteindre 600°).

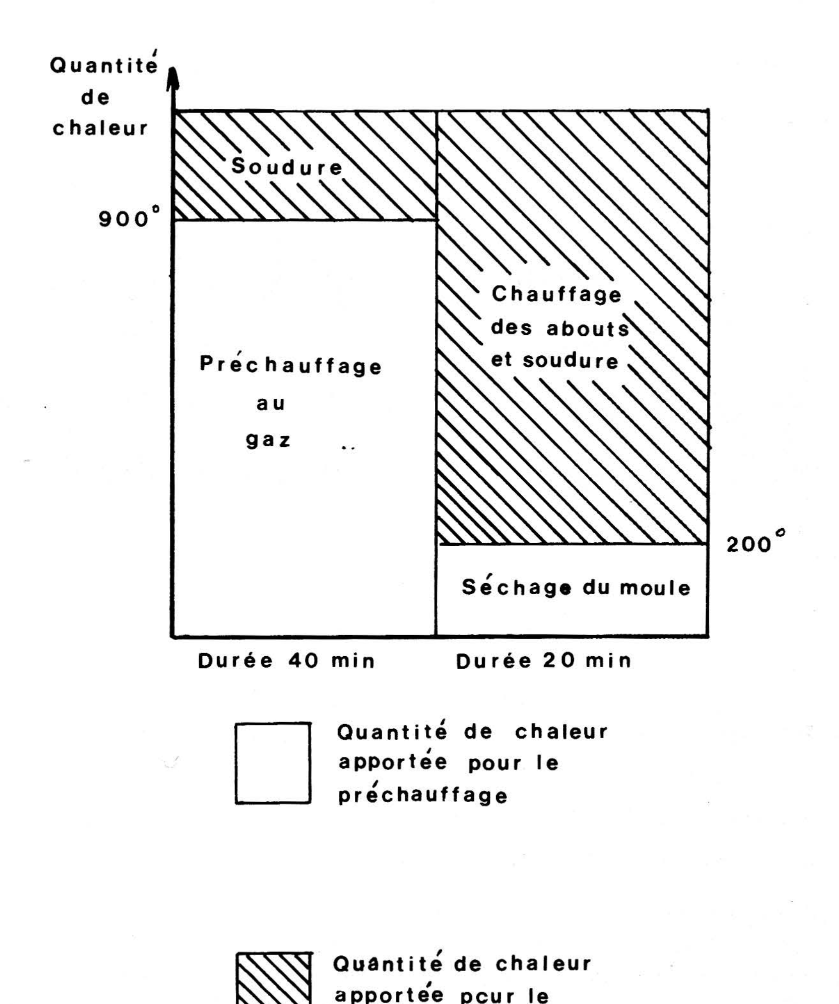


Fig. 137. — *Les divers types de soudure aluminothermique*

Il en résulte différentes combinaisons possibles entre préchauffage et charge dans lesquelles le volume de la charge et donc son coût varieront.

Le choix entre les différents procédés est finalement fonction :

- des conditions économiques,
- de la rapidité d'exécution exigée,
- des conditions de mise en œuvre,
- de la composition chimique des rails.

3.8.4. L'opération de soudage (fig. 138) se déroule de la façon suivante.

3.8.4.1. Réglage du joint (fig. 139).

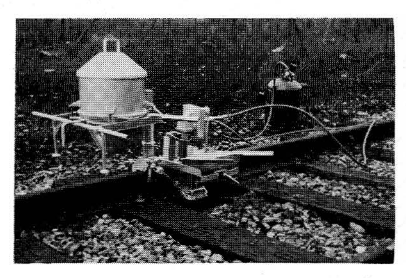


Fig. 138. — *Ensemble de soudure aluminothermique*

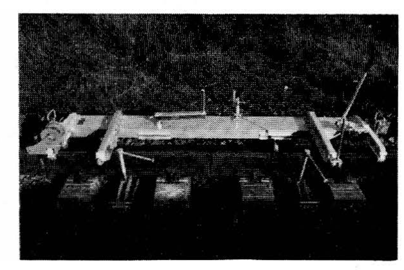


Fig. 139. — *Réglage du joint*

Les faces internes du champignon doivent être parfaitement alignées dans le plan horizontal sur une longueur d'un mètre (fig. 140) et un léger pointu dans le plan vertical est indispensable pour obtenir une bonne planéité du roulement après refroidissement de la soudure.

Autrefois réalisé à l'aide de coins placés entre le patin des rails et les traverses, le réglage est facilité aujourd'hui grâce à des dispositifs (fig. 141) qui facilitent l'opération et assurent après parfait alignement des abouts leur immobilisation pendant toute l'opération de soudage.

L'intercalaire, intervalle entre les deux extrémités des rails, est d'environ 20 mm. Il peut être de 50 mm, la soudure est alors dite large, elle permet d'éliminer certains défauts sans pose de coupon.

3.8.4.2. Moules

Aux débuts de la soudure aluminothermique, les moules étaient fabriqués sur les chantiers à partir de sable de fonderie tamisé (valeur moyenne 120 microns) exempt de calcaire, additionné d'argile colloïdale et tassé dans des carcasses métalliques. Ils étaient en deux pièces placées de part et d'autre du joint à souder.

Actuellement les moules sont fabriqués industriellement en usine dans d'excellentes conditions de précision et de protection contre l'humidité. Ils sont obtenus à partir d'un mélange de sable, de silicate de soude et d'oxyde de fer, pressé mécaniquement, durci au gaz carbonique puis séché au four. Ils sont constitués de 3 pièces (fig. 142) :



Fig. 140. — *Alignement de la face de roulement*

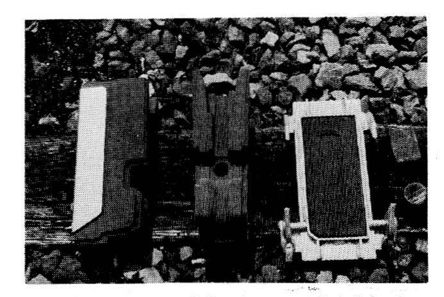


Fig. 141. — *Moules préfabriqués*

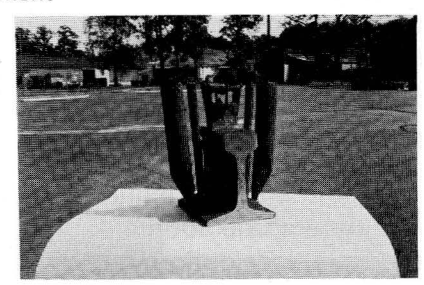


Fig. 142. — *Masselottes de coulée (procédé ALUMINOTHERMIQUE)*

une briquette placée sous le patin des rails et deux demi-moules serrés de part et d'autre du joint.

Le tracé du moule assure la présence d'une masselotte au-dessus du champignon, masselotte dont le but est de pallier les retassures qui se produisent lors du refroidissement du bain (fig. 147). Le moule possède également des évents nécessaires au préchauffage et à la circulation du métal coulé.

Les moules sont adaptés au profil des rails à souder. Il est en effet possible de souder des rails d'usures et profils différents.

L'étanchéité entre moule et rail (fig. 143) est assurée par lutage avec une pâte réfractaire. Cette opération assez délicate peut être facilitée par l'emploi de moule dit "joint sec". Ce sont des moules qui reçoivent en cours de fabrication une garniture en feutre réfractaire qui vient s'écraser contre le rail. Un léger cordon de pâte suffit alors à garantir une étanchéité parfaite. Outre le gain de temps qu'il procure, le joint sec assure un contour beaucoup plus net de la soudure.

3.8.4.3. Préchauffage

Quel que soit le procédé utilisé, il y a toujours emploi d'une source extérieure de chaleur.

Dans le procédé avec préchauffage, cette source est constituée généralement par un brûleur alimenté par un mélange essence ou propane-air pulsé. Cette opération assure la dessication du moule et doit être poursuivie jusqu'à ce que la température des abouts à souder atteigne 800° C. Dans la pratique, on vérifie que les extrémités des rails présentent la couleur rouge cerise. On peut également vérifier cette température des abouts à l'aide de crayons thermochromes (280° C sur le rail au ras du moule).

Cette opération dure, suivant le profil du rail et le pouvoir calorifique du brûleur une quinzaine de minutes.

Aussi a-t-on mis au point une soudure dite sans préchauffage. Dans ce procédé, on utilise encore une source extérieure de chaleur dont le seul but est d'assurer la dessication parfaite du moule. On utilise à cet effet un brûleur propane air induit maintenu dans le moule pendant 2 à 3 minutes.

Dans le procédé à préchauffage limité, on utilise encore le même brûleur propane-air induit mais pendant un temps forfaitaire de 5 minutes.

3.8.4.4. Soudure (fig. 144)

La charge de soudure livrée dans un sac plastique scellé doit être conservée à l'abri de l'humidité. Selon le profil du rail à souder, la largeur du joint et le procédé utilisé, son poids varie entre 5 et 18 kg.

Elle est vidée dans un creuset en forme de tronc de cône renversé constitué d'une gaine métallique garnie intérieurement d'un revêtement hautement réfractaire (magnésie) et placé au-dessus du moule.

La réaction est amorcée à l'aide d'une allumette pyrotechnique (tige métallique enrobée d'un mélange de poudres d'oxyde de baryum et d'aluminium dont l'extrémité garnie de phosphore s'enflamme par frottement).

L'orifice inférieur du creuset doit être obturé jusqu'à la fin de la réaction (fig. 145). Jusqu'à une époque relativement récente, cette obturation était réalisée avec un clou protégé par une rondelle d'amiante et de la magnésie que le soudeur refoulait à l'intérieur du creuset lorsqu'il jugeait la réaction terminée.



Fig. 143. — *Réalisation de l'étanchéité entre moule et rail (procédé DELACHAUX)*

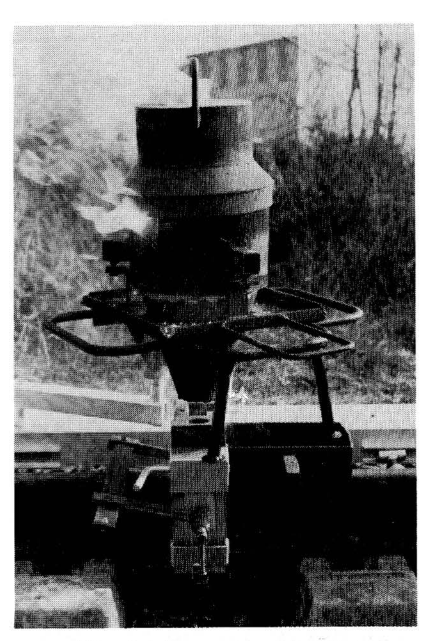


Fig. 144. — *Coulée d'une soudure DELACHAUX*

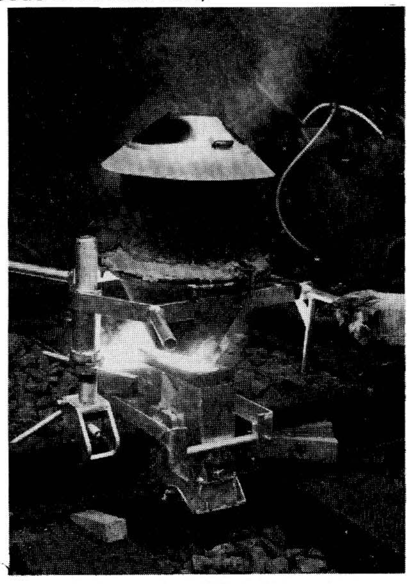


Fig. 145. — *Coulée d'une soudure ALUMINOTHERMIQUE*

Il pouvait résulter de cette appréciation des coulées trop froides ou prématurées d'où risques d'oxydation, collages, inclusions de corindon.

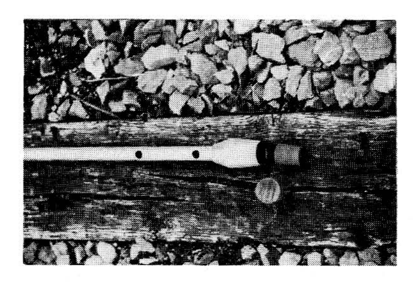




Fig. 146. — *Obturation du trou de coulée*

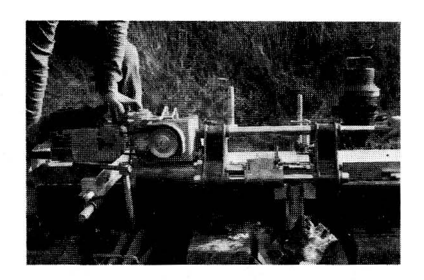


Fig. 148. — *Ébavurage d'une soudure*

L'orifice inférieur du creuset est actuellement obturé par une douille (fig. 146) dont le conduit est garni d'une substance fusible au contact du bain, dont le volume est calculé pour ne permettre la coulée qu'après achèvement de la réaction et décantation acier-corindon possible en raison des différences de poids spécifiques de ces deux composants (7,8 pour l'acier, 2,0 pour le corindon). La température du bain est de l'ordre de 1 980°.

En général, la coulée intervient dans un délai compris entre 15 et 25 secondes après la mise à feu en fonction des types de charge. L'étanchéité douille-creuset est assurée par de la magnésie. La coulée en chute libre dans l'axe du joint pouvant entraîner des inclusions de corindon au cœur de la soudure, l'orifice supérieur des moules est obturé par un bouchon dès achèvement du préchauffage. Grâce à ce dispositif, le jet de métal liquide est dirigé sur les différents canaux et évents réservés dans le moule (fig. 147) permettant soit une cou-

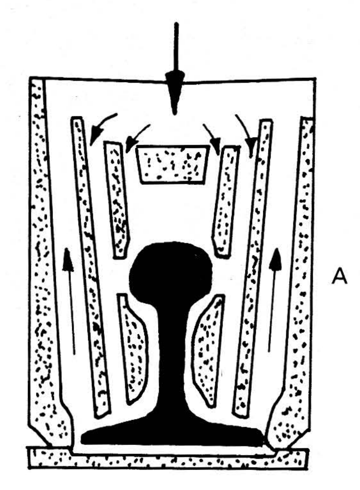
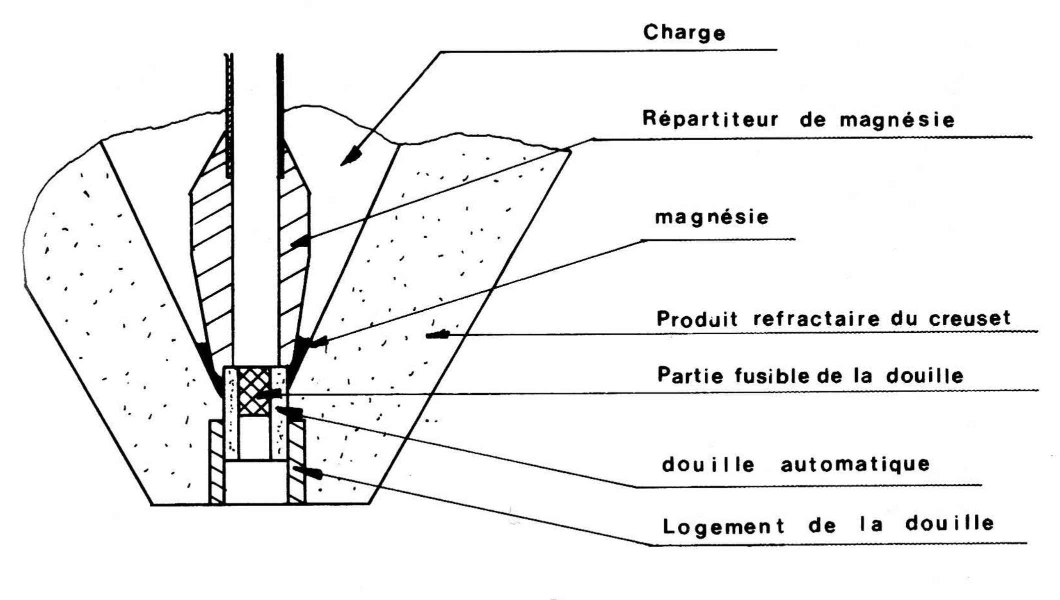


Fig. 147 A/B. — *Schémas de principe de la coulée*



B

lée en source (vers le patin) soit une coulée en tête (au niveau du champignon) soit une combinaison des deux systèmes suivant le procédé utilisé.

Une partie du corindon est emmagasinée à la partie supérieure du moule. L'excédent est recueilli dans un bac spécial.

La coulée entraîne de part et d'autre du joint la fusion des abouts de rails sur une distance pouvant aller jusqu'à 5 ou 6 mm suivant les procédés.

3.8.4.5. Finition (figure 148)

Dès que le métal est suffisamment solidifié le corindon de la partie supérieure du moule est décoché avec celle-ci. La masselotte et les évents autrefois éliminés manuellement à la tranche et à la masse sont maintenant découpés à l'aide de trancheuses hydrauliques dont la précision limite le travail de finition par meulage. La qualité de cette finition peut être contrôlée à l'aide de règles enregistreuses du type Neuweiler.

3.8.4.6. Durée de l'opération

On peut décomposer l'opération soudure de la façon suivante :

— réglage du joint	6 minutes
— pose des moules	3 minutes
— préchauffage	2 à 10 minutes suivant les procédés 5' dans le procédé à préchauffage limite imposé à la SNCF
— coulée	1 minute
— démoulage et tranchage	5 minutes environ selon rapidité de refroidissement de la masselotte

soit un total de 17 à 25 minutes environ suivant le procédé utilisé.

Sur un chantier continu et bien organisé, il est possible de réaliser avec une équipe de 6 hommes 4 soudures à l'heure. Dans le cas de soudures aluminothermiques en chantier fixe d'une certaine importance, on peut concevoir une mécanisation partielle du processus.

3.8.5. La dureté superficielle du champignon dans la zone de soudure présente le même aspect que celui rencontré dans le cas de la soudure électrique.

Les zones affectées thermiquement à chaque extrémité des rails sont légèrement moins dures que le rail par recuit et décarburation. Par contre, la soudure de par sa composition plus riche en carbone et manganèse est légèrement plus dure (différences de 20 à 30 HB), mais ces légères différences s'atténuent au roulement (fig. 149).

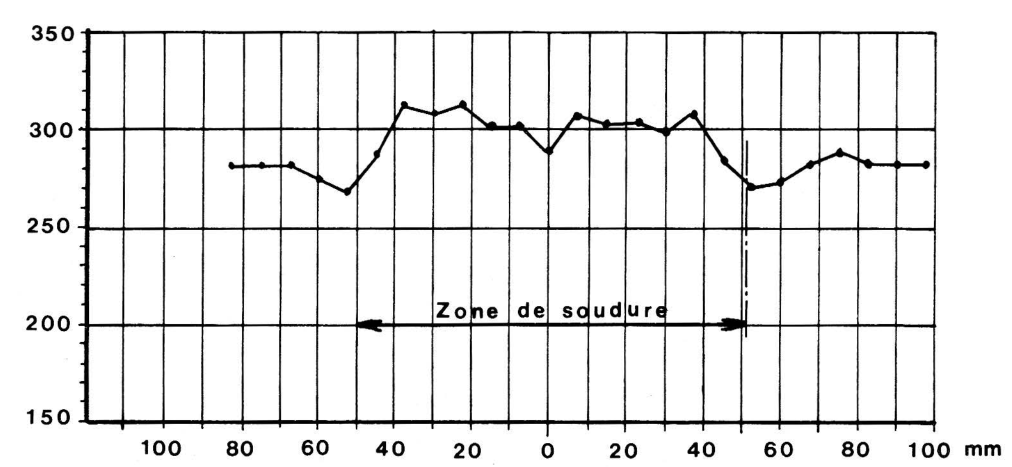


Fig. 149. — *Variation de la dureté superficielle dans la zone d'une soudure aluminothermique*

3.8.6. Les défauts de soudures peuvent provenir d'un mauvais réglage des abouts, d'un décalage des moules par rapport à l'axe du joint, du mauvais lutage, de préchauffage insuffisant ou mal conduit, de charges défectueuses ou ayant repris de l'humidité, d'un moule insuffisamment sec, d'inclusion de sable ou de corindon, de collage par débouchage prématuré ou tardif, de refroidissement trop rapide pour l'acier extra dur (110 kg) notamment, du changement de section au droit des bourrelets, d'efforts anormaux durant la phase de refroidissement.

Toutes ces causes sont l'objet de soins attentifs de la part des fournisseurs et le souci majeur des responsables de la formation des soudeurs.

Sur la SNCF, tous les soudeurs reçoivent un agrément professionnel et sont munis d'un poinçon permettant d'identifier leur travail (date d'exécution de la soudure, numéro de code de l'opérateur). Ils sont recyclés tous les trois ans.

Dans ces conditions, on peut considérer que la qualité géométrique et mécanique de la soudure aluminothermique est voisine de celles des soudures électriques.

Au point de vue coût on peut estimer la soudure électrique à un prix moindre que la soudure aluminothermique pour les grandes séries, mais ce sera l'inverse pour de petites séries ou des réparations isolées en voie, ce qui oriente les décisions des utilisateurs.

3.9. Soudure oxyacétylénique

Le procédé au gaz, qui a été particulièrement développé au Japon permet d'obtenir une soudure au-dessous du point de fusion du métal par diffusion et recristallisation sous pression alors que le métal est encore plastique et non liquide. Le rail est maintenu par des mâchoires dans la machine à souder et les extrémités sont pressées à froid sous une pression d'environ 20 MPa et soumises aux flammes de chalumeaux oxyacétyléniques ou d'un mélange fuel-oxygène. Un bourrelet de forgeage commence à se produire à la température de 1 100° et lorsque le métal est assez pâteux. Vers 1 230° se forme le bourrelet définitif avec une perte de longueur de l'ordre de 10 mm. Après refroidissement au-dessous de 500°, la soudure est normalisée sur

environ 150 mm de longueur vers 850° à l'aide de chalumeaux. La durée de l'opération est d'une dizaine de minutes, augmentée de cinq minutes pour la normalisation. Le parallélisme des surfaces et leur état de propreté jouent un rôle important dans la qualité obtenue. Une équipe d'une douzaine d'hommes peut exécuter de 40 à 50 soudures par journée de 8 heures.

Les JNR (Japon) opèrent avec une soudeuse mobile, les soudures de rails durs pouvant subir un traitement thermique par réchauffage de 600 à 1 000° et trempe par jet d'air.

3.10. Soudures à l'arc

3.10.1. La soudure à l'arc est un procédé avec métal d'apport dans lequel on fait jaillir un arc électrique entre une électrode métallique fusible et les pièces à souder, reliées à la masse. L'arc très lumineux à une température de 2 700 à 3 500° entraîne la fusion de l'électrode et du métal de base sur une certaine profondeur de pénétration. La tension d'arc est proportionnelle à sa longueur, l'intensité variant en sens inverse, mais croissant avec le diamètre de l'électrode (30 à 40 ampères par millimètre de diamètre). La tension d'amorçage est de l'ordre de 80 Volts et la tension d'arc (qui permet d'en apprécier la longueur) de l'ordre de 20 à 35 Volts. Pour une électrode donnée, la quantité de métal déposé est fonction de l'intensité et de la vitesse d'avance de l'électrode. La figure 150 montre que le point de fonctionnement doit se maintenir entre la tension à vide (coupure d'arc) et l'intensité de court-circuit d'où la nécessité d'une grande stabilité dans la longueur de l'arc, fonction de la qualification et de l'habileté du soudeur.

3.10.2. L'alimentation de l'arc peut être faite par un appareil statique (transformateur) ou sur le tas par un groupe tournant qui pose essentiellement des problèmes de poids et d'insonorisation (cf. chapitre ''Maintenance'').

3.10.3. On n'emploie plus d'électrodes nues. Les électrodes enrobées sont constituées par un fil métallique entouré d'un enrobage à base de silicates, oxyde de fer, ferro-alliages, etc. L'enrobage stabi-

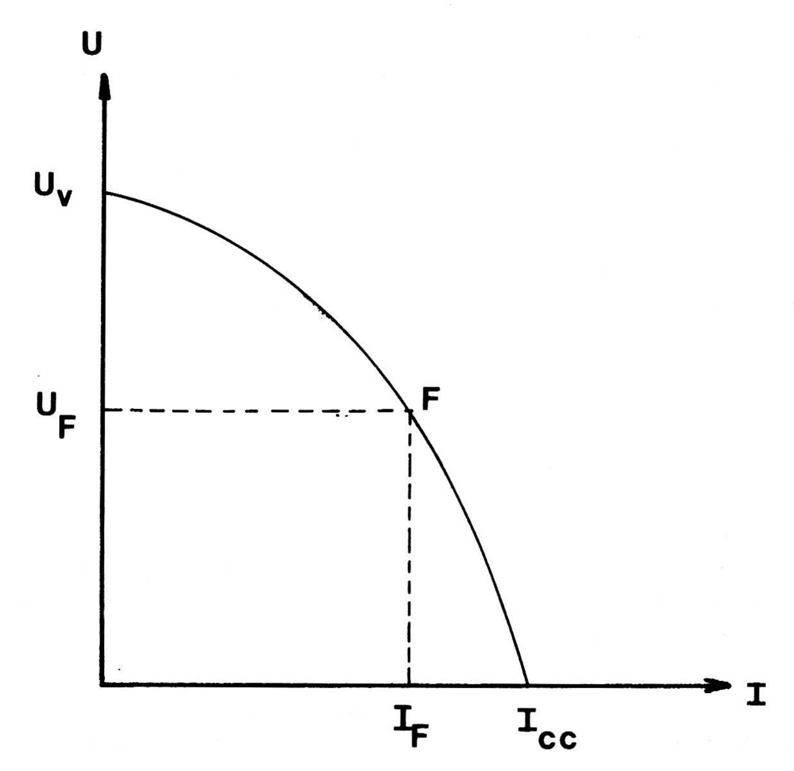


Fig. 150. — *Stabilité d'arc électrique*

lise l'arc en augmentant l'état d'ionisation entre l'électrode et les pièces à souder ; fondant avec un certain regard sur l'âme, il améliore le guidage de l'arc, il crée autour du point de fusion une atmosphère protectrice qui évite l'oxydation et enfin il peut apporter certains compléments d'alliages à la soudure. Le bain de laitier qui se forme sur le métal le protège et ralentit le refroidissement. Les électrodes basiques sont bien adaptées au rail.

Les électrodes doivent être gardées au sec, éventuellement étuvées avant usage et ne pas présenter de traces de fissuration de leur enrobage.

L'arc peut être alimenté en courant continu ou alternatif ; le désamorçage étant plus facile en alternatif, le soudeur doit maintenir une longueur d'arc plus constante d'où résulte une soudure plus régulière.

3.11.4. Les cordons de soudure doivent être exécutés de façon telle que les cratères d'amorçage et d'extrémités qui sont inévitables soient systématiquement éliminés par meulage ultérieur ou refusion pour éviter tout risque de microfissuration interne. Pour la soudure de deux rails, la soudure à l'arc nécessite l'utilisation d'un moule qui permet le maintien en place du métal liquide entre les deux abouts de rails écartés d'environ 15 mm. Le patin repose sur une platine en cuivre ; on commence la soudure par le patin et au fur et à mesure de l'avancement du travail, on monte des éléments de moules en céramique. Il faut en outre soigneusement éviter toute inclusion de laitier dans la soudure.

Avant soudure, il est nécessaire, comme on fait dans les autres procédés, de réchauffer les abouts de rails sur 100 mm de part et d'autre du joint à une température d'environ 400°, à l'aide de brûleurs à gaz. Ce procédé très délicat d'application dans la suite des dépôts de cordons et qui exige une main-d'œuvre de haute qualification est très long (1 heure par joint) et ne semble par conséquent présenter aucun intérêt vis-à-vis des procédés concurrents.

Nous examinerons dans le chapitre consacré à la maintenance des rails l'utilisation de la soudure à l'arc pour les réparations, ce procédé présentant alors beaucoup d'intérêt.

3.11. Soudure par bombardement électronique

Sous un vide de l'ordre de 10^{-5} torr, on envoie sur les pièces à souder un faisceau d'électrons dont l'énergie cinétique se transforme en énergie calorifique. La soudure nécessite la préparation des abouts par fraisage, mais la phase de refoulement est supprimée. Les électrons sont produits par un canon et accélérés par un champ de plusieurs dizaines de milliers de volts. La directivité du faisceau permet de limiter au strict minimum la surface de chauffe, les deux pièces à souder étant rigoureusement immobiles et le vide assurant une protection efficace contre l'oxydation. Des essais de laboratoire ont déjà permis de souder des rails avec ce procédé en 30 secondes avec deux canons à électrons, en obtenant une soudure de haute qualité due semble-t-il à la très faible déformation géométrique, à l'absence de forgeage, à la faiblesse de la zone affectée par le chauffage et à l'absence de bourrelet. Mais le passage à la phase industrielle néces-

site encore un certain nombre de recherches pour rendre ce procédé économiquement compétitif. En ce qui concerne le laser, la puissance des émetteurs du commerce ne permet pas encore la soudure de pièces de la dimension des rails, mais ce procédé pourrait dans l'avenir se révéler efficace. En conclusion, seuls les soudages par étincelage et aluminothermiques sont d'un emploi quasi universel.

3.12. Réception de soudures

Sur la SNCF, qu'il s'agisse de soudures réalisées par étincelage ou par induction, la réception ne concerne que la géométrie des soudures. Les tolérances admises sont les suivantes (+ indiquant une bosse et − un creux).

Pour les lignes parcourues à V $\geqslant$ 160 km/h

dans le sens vertical : ± 0,3 mm mesurés sur une corde de 1,7 m
dans le sens latéral : ± 0,5 mm mesurés sur une corde de 1,7 mm.

On procède dans ce cas à un enregistrement continu de la barre longue complète : on considère que lorsque les tolérances sont observées, la soudure ne se distingue pratiquement pas sur l'enregistrement du reste de la barre.

Pour les autres lignes :

dans le sens vertical : ± 0,2 mm mesurés sur une corde de 1 m
dans le sens latéral : { + 0,2 mm) / − 0,4 mm) } mesurés sur une corde de 1 m

La DB applique des mesures analogues. Le BS II prescrit + 0.8 en horizontal et + 0.8 en vertical sous règle de 1 500 mm.

Outre ces contrôles de réception, on procède simplement par sondage à des vérifications complémentaires qui consistent en essais de flexion à la presse ou de rupture au mouton de choc : comme elles ne concernent pas un échantillon de chacune des fabrications en cours, on ne peut dire qu'il s'agit d'un contrôle-systématique de fabrication. Ces essais permettent simplement de s'assurer qu'il n'y a pas de dérive dans la qualité due par exemple à un déréglage de certains paramètres, notamment après une révision complète, à l'occasion d'un changement de fabrication ou pour une fabrication concernant des nuances d'aciers utilisées de façon peu courante.

On dispose de deux types d'essais

a. *Essais à la presse*

Essais en flexion verticale : distance entre appuis = 1 m

Patin en tension, flèches minimales admises sans fissures

— pour du rail de nuance normale : 30 mm
— pour du rail naturellement dur : 20 mm.

La DB impose les mêmes tolérances.

Soudures aluminothermiques. Sur la SNCF, sur rails neufs ou rails de réemploi recoupés, la flèche verticale ne doit pas excéder ± 0,2 mm mesurée avec une règle d'un mètre et ± 0,5 mm sur la face verticale du champignon. Les soudures aluminothermiques sont contrôlées aux ultrasons (dessus du patin et champignon).

b. *Essais au mouton de choc*

masse du mouton : 300 kg
distance entre appuis : 0,5 mm
patin ou champignon en tension.

Essais par chutes répétées à partir d'une hauteur minimale de 0,5 m et par paliers de 0,5 jusqu'à 4 m puis par paliers de 1 m jusqu'à une hauteur de chute de 12 m.

Si la rupture du rail ne s'est pas produite à 12 m, un deuxième et dernier essai est effectué à cette hauteur.

L'interprétation des résultats est délicate et il n'existe pas de ''cahier des charges'' les concernant ; on procède généralement de la façon suivante : si la hauteur de rupture ne s'écarte pas sensiblement des valeurs habituellement constatées pour l'essai considéré, celui-ci est déclaré satisfaisant. Dans le cas contraire, le faciès de rupture fait l'objet d'un examen de laboratoire qui peut conduire à des essais complémentaires.

Le BS II prévoit un essai de choc (drop test) sur base de 1,22 m (patin en tension) : la déflexion doit au moins atteindre 1 pouce 3/4 (44.5 mm) sous 3 chocs d'un mouton de 1,19 tonne tombant de 2.13, 2.75 et 3.36 mètres.

3.13. Remarque

Compte tenu de la diminution importante des propriétés mécaniques de l'acier lorsque la température augmente, il est impératif de ne pas faire franchir une soudure, électrique ou aluminothermique, par un essieu tant que la température extérieure du champignon excède 360°, ce qui correspond à une température interne d'environ 600°, suffisante pour éviter tout dommage.

RÉSUMÉ DU CHAPITRE 6

Les rails sont généralement livrés par les usines productrices en longueurs standards de 18 à 36 mètres. La pose de tels rails nécessite des précautions pour la conception des éclissages qui restent cependant des points faibles de la voie et impose l'utilisation de rails légèrement plus courts dans les courbes pour compenser la différence de développement des deux files. Enfin, le cheminement des rails impose une surveillance périodique de leur ouverture pour éviter tout risque de coincement.

A l'heure actuelle, les voies sont posées en longs rails soudés (LRS) de longueur illimitée, ce qui offre de nombreux avantages de confort, de moindre fatigue pour le matériel roulant, de nuisance et surtout d'importantes économies de maintenance de la superstructure de la voie. Mais la pose en LRS nécessite de grandes précautions pour tenir compte des problèmes posés par leur stabilité longitudinale et surtout transversale ; à la pose, la température, la rectitude géométrique et les conditions de libération des contraintes jouent un rôle particulièrement important ; à l'entretien, on ne peut intervenir que dans certaines limites de température et toutes précautions doivent être prises lors de la réparation des ruptures de rails pour éviter l'apparition de pics de contraintes.

Les procédés de soudage utilisés en voie et en atelier tiennent compte de possibles phénomènes de trempe qui risquent d'entraîner une fragilisation de la soudure. En atelier, on utilise le plus généralement la soudure électrique par étincelage dont les phases successives sont :

la mise en place géométrique des rails intéressés, le préchauffage par accostages successifs, l'étincelage, le forgeage par pression hydraulique et l'ébavurage, maintenant incorporé dans la soudeuse. Les soudeuses modernes, alimentées en courant monophasé ou continu, d'une puissance de l'ordre de 300 kva avec une intensité de 6 000 ampères réalisent par heure environ 25 soudures de haute qualité. On peut jouer sur toute une série de paramètres (intensité, tension, nombre des accostages et vitesse d'avance, pression et durée du refoulement) pour améliorer la qualité. Plus lente et plus onéreuse, la soudeuse par induction donne une remarquable qualité géométrique, indispensable sur les lignes à très grande vitesse et la possibilité de souder sans difficulté des aciers à haute limite élastique.

En voie, on utilise des soudeuses par étincelage analogues aux engins d'atelier et la soudure aluminothermique actuellement de très bonne qualité. Les charges, composées d'aluminium et d'oxydes de fer, nécessitent ou non un préchauffage suivant leur composition. Le réglage des abouts de rails est réalisé à l'aide de dispositifs ad hoc, les moules sont préfabriqués, la coulée se fait à partir de douilles à débouchage automatique et l'ébavurage utilise des tranches hydrauliques.

Les autres types de soudage sont ou bien plus lents et plus chers (soudage à l'arc ou au chalumeau oxyacétilénique) ou bien non encore industriellement au point (bombardement électronique).

Les soudures électriques ou aluminothermiques modernes ont des propriétés mécaniques très voisines de celles des rails adjacents et ne présentent que peu de défauts sous l'action du passage des circulations. La soudure elle-même a une dureté légèrement plus élevée que celle du rail avec une partie intermédiaire un peu moins dure.

Les procédés de réception sont essentiellement basés sur le contrôle de la qualité géométrique et sur des essais de choc en vue de détecter toute fragilité éventuelle résultant des effets thermiques de la soudure.

7 DÉFAUTS DES RAILS

1. Généralités

Le rail est le siège de défauts dont certains peuvent dégénérer en ruptures. Il est donc essentiel de pouvoir les analyser, si possible en prévenir l'apparition, et en tout cas intervenir avant qu'il ne soit trop tard.

1.1. Il est souhaitable, comme tel est le cas sur la SNCF, que les rails neufs posés en voie fassent l'objet d'un traitement informatique conservant en mémoire les caractéristiques principales et le lieu de pose. Toute avarie ou toute rupture doit ensuite faire l'objet d'un autre traitement. L'exploitation des deux fichiers obtenus, ainsi que de celui des usines productrices permet de nombreuses études statistiques et surtout des études technologiques sur l'incidence que peuvent avoir les divers facteurs de forme et de fabrication sur les avaries de rails : ces fichiers jouent donc un rôle fondamental dans les progrès possibles de la métallurgie du rail.

Les ruptures et avaries de rails sont fonction de toute une série de paramètres dont les principaux sont : le trafic, la charge par essieu, la vitesse, les périodicités de renouvellement, les longueurs élémentaires de rails, le type de pose (LRS), l'état d'entretien de la voie, le tracé (courbes), le mode de traction, les méplats autorisés, etc. Donc toute comparaison de statistiques entre réseau est sujette à caution

et ne peut aboutir à des conclusions qu'après une analyse très fine des caractéristiques de chacun d'eux. Par ailleurs, la politique de chaque réseau peut varier entre deux extrêmes : remplacement systématique des rails affectés d'avaries non réparables susceptibles de dégénérer en ruptures, ce qui assure la sécurité à un prix pouvant être relativement élevé, ou surveillance et consolidation jusqu'à rupture, ce qui n'est pas exempt de risques. La politique retenue est caractérisée par le rapport $\frac{R}{A}$ du nombre annuel de ruptures au nombre annuel d'avaries. D'après un compte rendu de 1965, ce rapport (défaut 200 exclu) était de 0.023 et de 0.688 pour deux grands réseaux et s'élevait même à 5.475 pour un autre réseau européen. Il est cependant bien difficile de porter un jugement a priori sur la politique suivie fonction de très nombreux paramètres (densité et nature du trafic, vitesse, tracé, mesures de sécurité prises, etc.). Les statistiques ne peuvent donc que présenter une valeur interne, mais cette valeur est très élevée car leur analyse est un facteur déterminant d'appréciation de la qualité des fabrications et de la politique suivie en matière de rails.

1.2. Statistiques

Le tableau 25 donne les statistiques 1983 des ruptures et avaries sur la SNCF. Ces statistiques en nombre absolu, en évolution lente d'une année à l'autre, n'ont en elles-mêmes qu'une valeur indicative, car elles ne sont significatives que dans la mesure où elles peuvent être rapportées à un dénominateur, le nombre de rails de la population considérée : or, ce nombre ne commence à être que très partiellement connu grâce au fichier des rails neufs susmentionnés.

DÉFAUTS	Avaries nombre	%	Ruptures nombre	%	Nombre d'avaries détectées par auscultation
a) imputables à la fabrication					
défauts des abouts	335	2,2	4	0,5	
fissuration transversale du champignon du rail	1 966	13,1	134	17,7	1 875
fissuration horizontale du champignon	709	4,7	22	2,9	446
fissuration verticale longitudinale du champignon	193	1,3	2	0,3	
défauts de surface	643	4,3	0	0	
fissuration de l'âme	27	0,2	3	0,4	
retassure, repliure	6	—	—	—	
fente au patin	12	0,1	13	1,7	
total a)	**3 891**	**25,9**	**178**	**23,5**	
b) imputables à l'utilisation					
écaillage d'abouts	274	1,8	—	—	
étoilures de trous d'éclissage	113	0,8	18	2,4	
empreintes patinage	3 640	24,2	91	12,0	1 346
usure latérale	1 102	7,3	—	—	—
usure ondulatoire	276	1,9	—	—	—
corrosion	95	0,6	54	7,1	
divers dont blessures	316	2,1	35	4,6	
total b)	**5 816**	**38,7**	**198**	**26,1**	
c) imputables à la fabrication ou à l'utilisation					
rupture sans cause apparente	—	—	22	2,9	
fissuration horizontale au raccordement âme-champignon aux abouts	— 1 046	— 7	— 26	— 3,4	633
shelling	1 325	8,8	—	—	
écrasement localisé	837	5,5	—	—	
total c)	**3 208**	**21,3**	**48**	**6,3**	
d) soudures					
soudures électriques	**855**	**5,7**	**71**	**9,3**	
soudures aluminothermiques	875	5,8	235	31	
fissurations sous rechargements	391	2,6	29	3,8	
total d)	**2 121**	**14,1**	**335**	**44,1**	
total a + b + c + d	**15 036**	**100**	**759**	**100**	

TABLEAU 25

1.3. Les politiques des divers réseaux en matière de remplacement de rails, nous l'avons vu, ne sont pas les mêmes. D'un autre côté, les défauts ont évolué au fil des années. Par exemple, les ruptures brusques, très craintes il y a 50 ans ont cédé la place aux fissurations de fatigue. Avec l'amélioration des procédés de fabrication, les défauts de fatigue ont disparu dans les rails récents, mais la sensibilité à l'effet d'entaille des aciers à très hautes caractéristiques mécaniques attire de nouveau l'attention sur les problèmes de fragilité.

L'analyse complète des défauts a été faite par l'UIC qui a édité un album permettant au personnel d'entretien de reconnaître sans ambiguïté les défauts constatés sur les rails en service.

1.4. On peut, au vu de ce tableau, faire un certain nombre de réflexions intéressantes :

— quatre postes : les empreintes de patinage, les fissurations transversales du champignon ou "taches ovales", le shelling et les fissurations au raccordement âme-champignon aux abouts, représentent 53,1 % du nombre total des avaries. Si l'on y ajoute les fissurations horizontales, l'usure latérale, les écrasements localisés et les avaries de soudure, on couvre 84,7 % des avaries. C'est donc sur cet ensemble qu'il convient de porter plus particulièrement l'attention.

  Il en est de même pour les ruptures : les fissurations transversales du champignon, les soudures et les empreintes de patinage représentent 73,8 % du nombre total des ruptures ;

— le rapport du nombre de ruptures au nombre d'avaries est très faible (5 %). Ce chiffre résulte de la politique de la SNCF de détection systématique des avaries par observation visuelle et surtout par contrôle non destructif, avant qu'elles ne dégénèrent en ruptures ;

— les avaries sont inégalement dangereuses. On peut à cet égard caractériser le degré de risques par le rapport du nombre de ruptures au nombre d'avaries, tout au moins pour les principaux types de défauts. Ce rapport est particulièrement élevé pour :

  - les fentes au patin (108 %), mais le nombre de ruptures est très faible en valeur absolue (13) ; ce défaut ne concerne en outre que des rails d'ancienne fabrication (avant cannelure fendeuse) qui sont en cours de disparition. Mais ce défaut est pratiquement indétectable,

- l'âme (11 %) qui n'est intéressée cependant que par un nombre d'avaries très limité (3 ruptures),
- la corrosion (57 % pour 54 ruptures). Ce défaut n'intéresse cependant que des zones très limitées (en général les souterrains humides). Mais, touchant essentiellement le patin, il est très difficilement détectable ;

— les soudures (8,3 % en électrique, 26,9 % en aluminothermique pour des valeurs absolues de 71 et 235 ruptures. Les pourcentages de détection sont respectivement de 87 et 60,4. On peut attribuer ces résultats à la difficulté d'interprétation des contrôles non destructifs de soudures : les nouveaux engins d'auscultation mis en service doivent améliorer la situation, de même qu'une recherche d'analyse plus fine des signaux recueillis. La différence entre les deux types de soudures s'explique par le fait que les avaries de soudures aluminothermiques se situent souvent dans le patin ou sont constituées par des collages, le tout impossible ou tout au moins très difficile à détecter ;

— les étoilures de trous d'éclisses (15,9 % pour 18 ruptures), mais les abouts sont en voie de disparition et les voitures anciennes d'auscultation ne permettaient pas, contrairement aux nouveaux engins la détection de ces défauts.

Par contre, les chiffres sont très favorables pour :

— les fissurations transversales et horizontales du champignon (respectivement 6,8 et 3,1 %). Le contrôle non destructif joue un rôle fondamental puisqu'il a détecté 95,8 et 60,4 % alors qu'il n'est pas pratiqué sur la totalité du réseau.

La différence entre vertical et horizontal s'explique par une insuffisance pour les fissures horizontales des anciennes voitures d'auscultation en 1983, remplacées depuis par un nouvel engin ;

— les empreintes de patinage (2,5 %), avaries visibles, peu dangereuses si elles sont bien contrôlées et aisément réparables ;

— les fissurations horizontales au raccordement âme-champignon aux abouts (2,5 %) aisément détectables (60,5 %) par auscultation (en grande partie ultrasonore, le reste au marteau),

— les fissurations sous rechargement (7,4 %) peu dangereuses si le travail a été bien exécuté et détectées à 68 %.

Enfin, même les ruptures sont inégalement dangereuses. Les statistiques (1) effectuées à vrai dire vers 1965 montrent que le rapport

(1) Les chiffres de ruptures et accidents, rapportés au trafic sont sensiblement les mêmes aux USA et en Europe.

du nombre de déraillements dus à des ruptures au nombre de ruptures varie de 0,5 % à 5,5 % suivant la nature de l'avarie, avec deux exceptions, 33,8 % pour les empreintes de patinage et 40 % pour certaines fissurations d'âme ou repliure, mais le nombre de ce type d'avaries dans la statistique est trop faible pour ne pas mettre en doute la validité du résultat. Dans les autres types, les défauts d'abouts et les taches ovales paraissent les plus dangereux, vraisemblablement parce qu'ils entraînent souvent des cassures multiples : bien entendu depuis l'établissement de ces statistiques, l'amélioration de la fabrication, de la détection et de la pose ont en grande partie réglé le problème. Au total, cette statistique confirme l'importance du problème de fissuration horizontale et transversale, des empreintes de patinage et de défauts de soudure. Les abouts restent dangereux bien qu'en voie de disparition sur beaucoup de réseaux. Notons enfin l'importance de l'usure, soit latérale, déjà examinée, soit ondulatoire qui fera l'objet d'un chapitre particulier et qui pose des problèmes avant tout économiques.

Pour terminer ces remarques, notons enfin l'importance de l'analyse statistique du suivi des défauts. Elle montre, par exemple, pour la SNCF l'évolution du nombre de retraits d'un certain nombre de défauts caractéristiques (fig. 151) et l'amélioration qui résulte des mesures prises. Elle oriente souvent les chercheurs et laboratoires vers l'étude de défauts bien déterminés.

2. Classement des défauts

2.1. On peut classer les avaries de rails en quatre groupes principaux :

- défauts dus à la fabrication,
- défauts dus à l'utilisation (certains dus d'ailleurs à la fabrication ou à l'utilisation),
- usure ondulatoire,
- défauts de soudures.

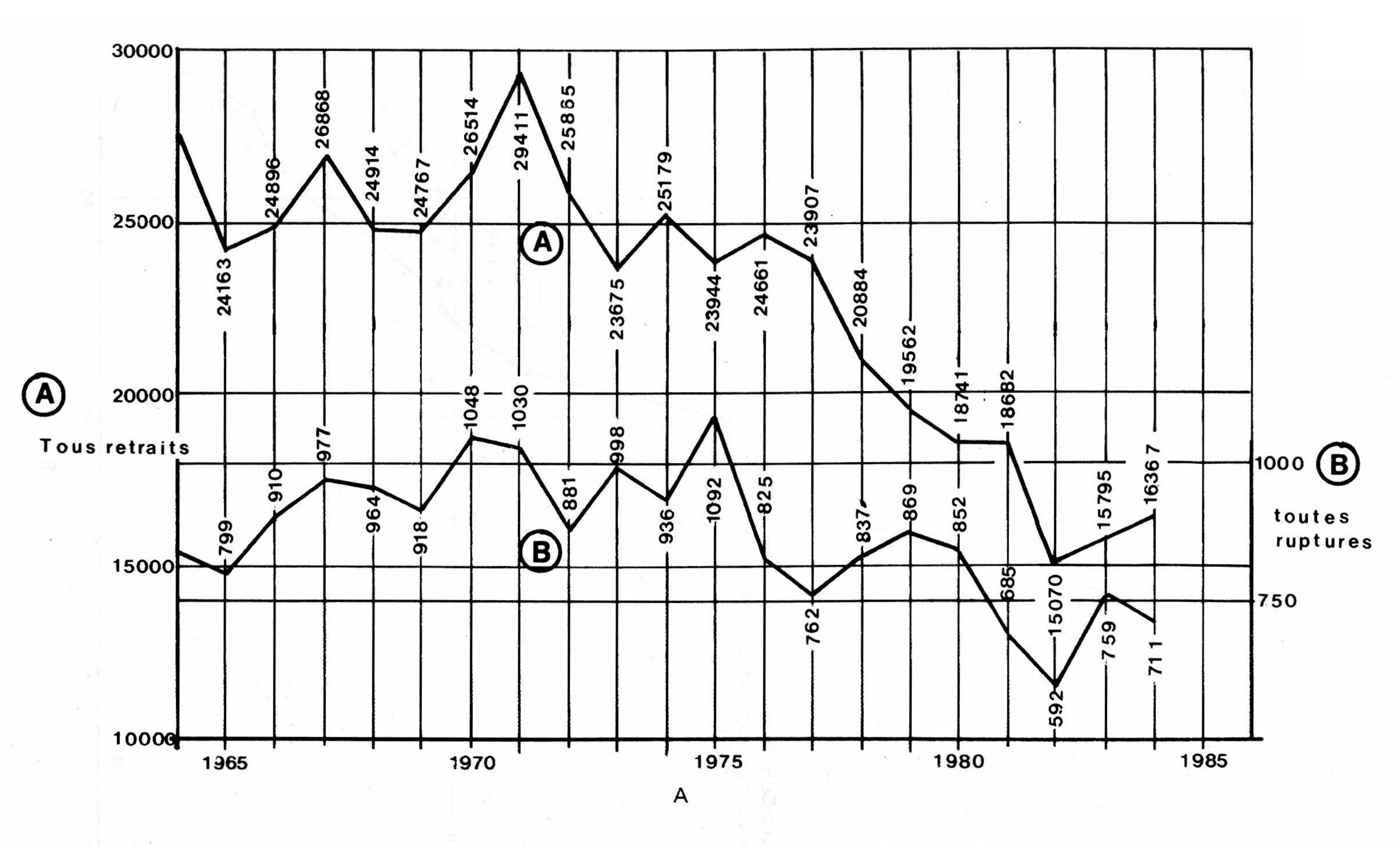
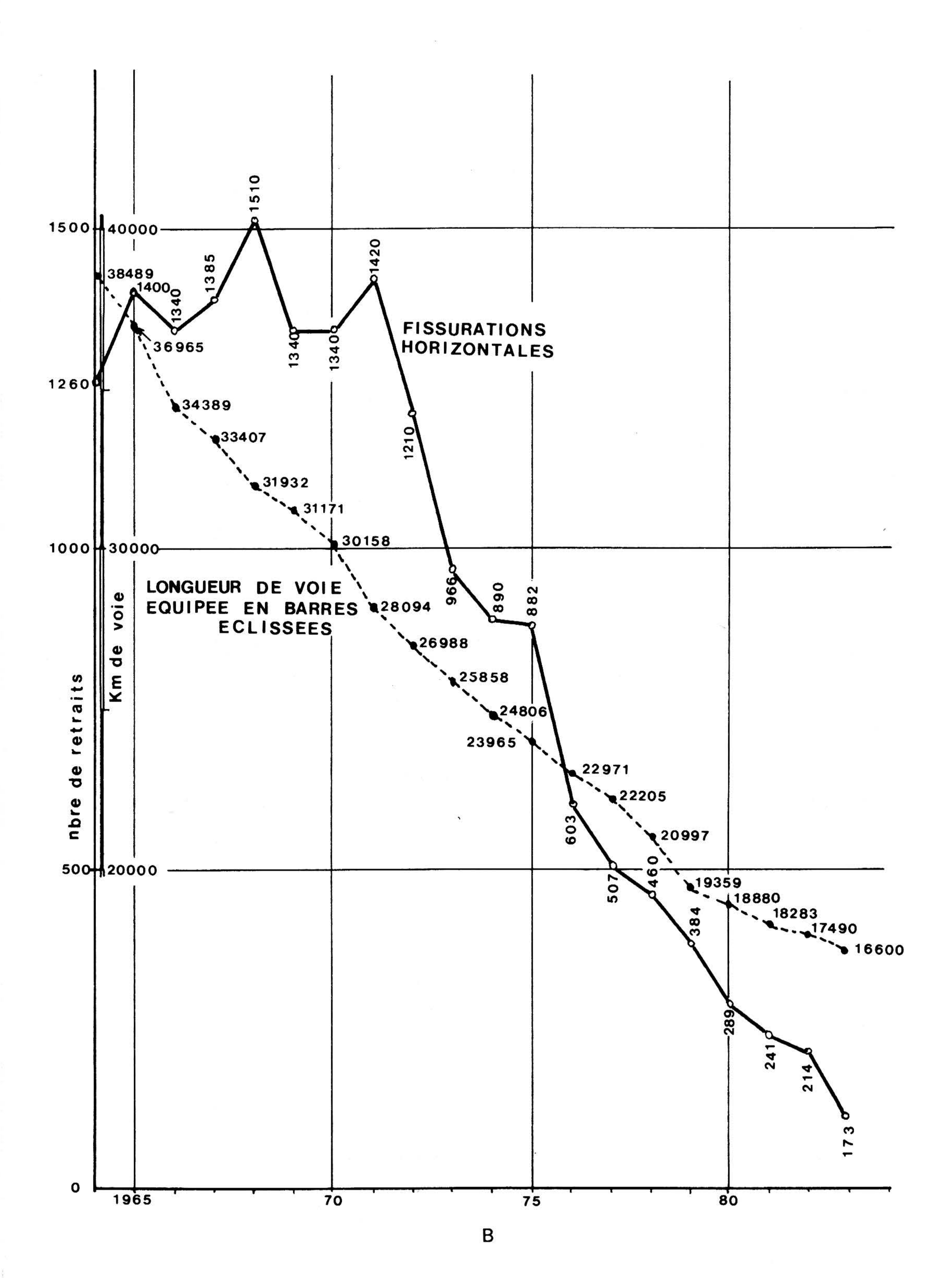
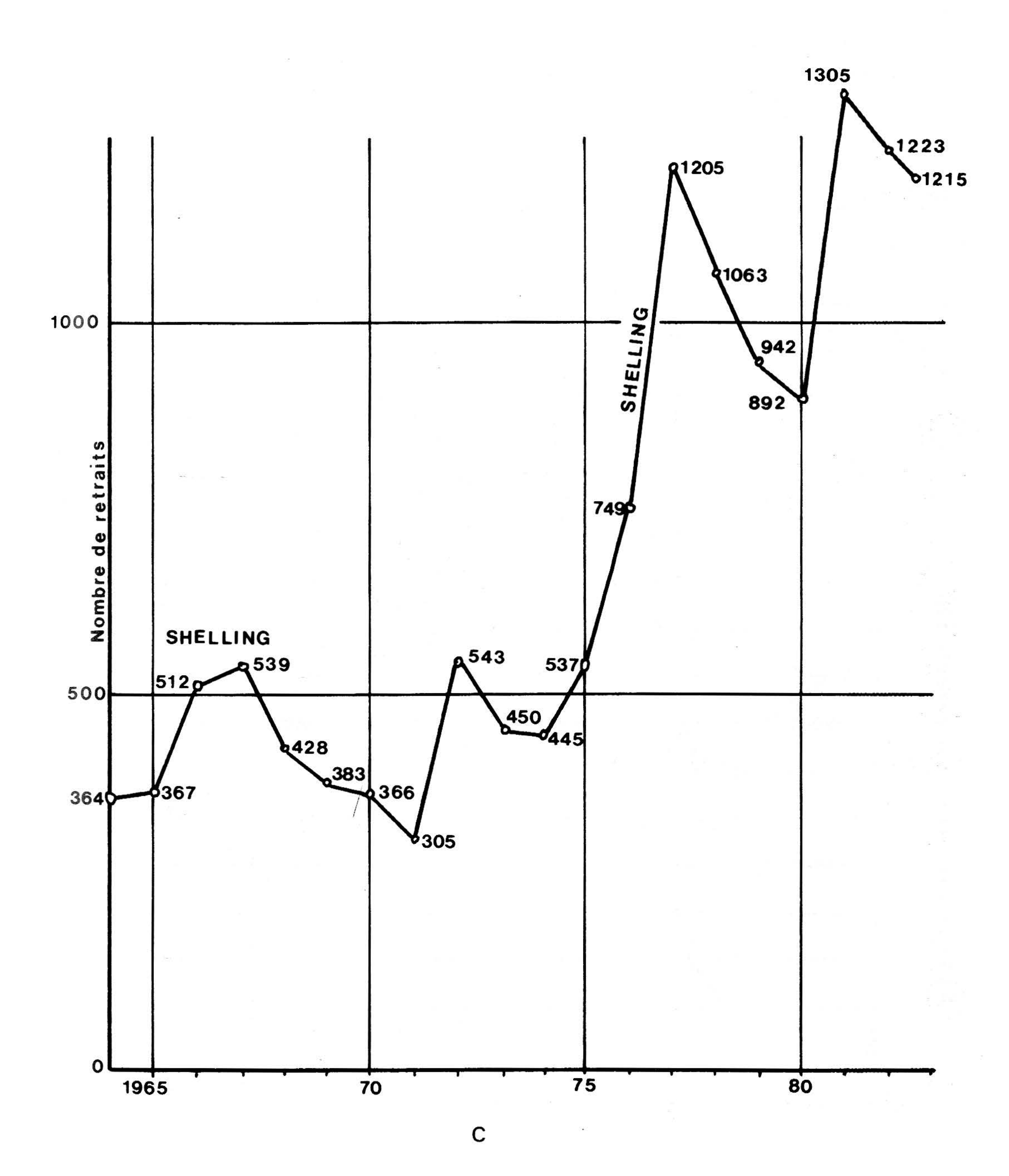
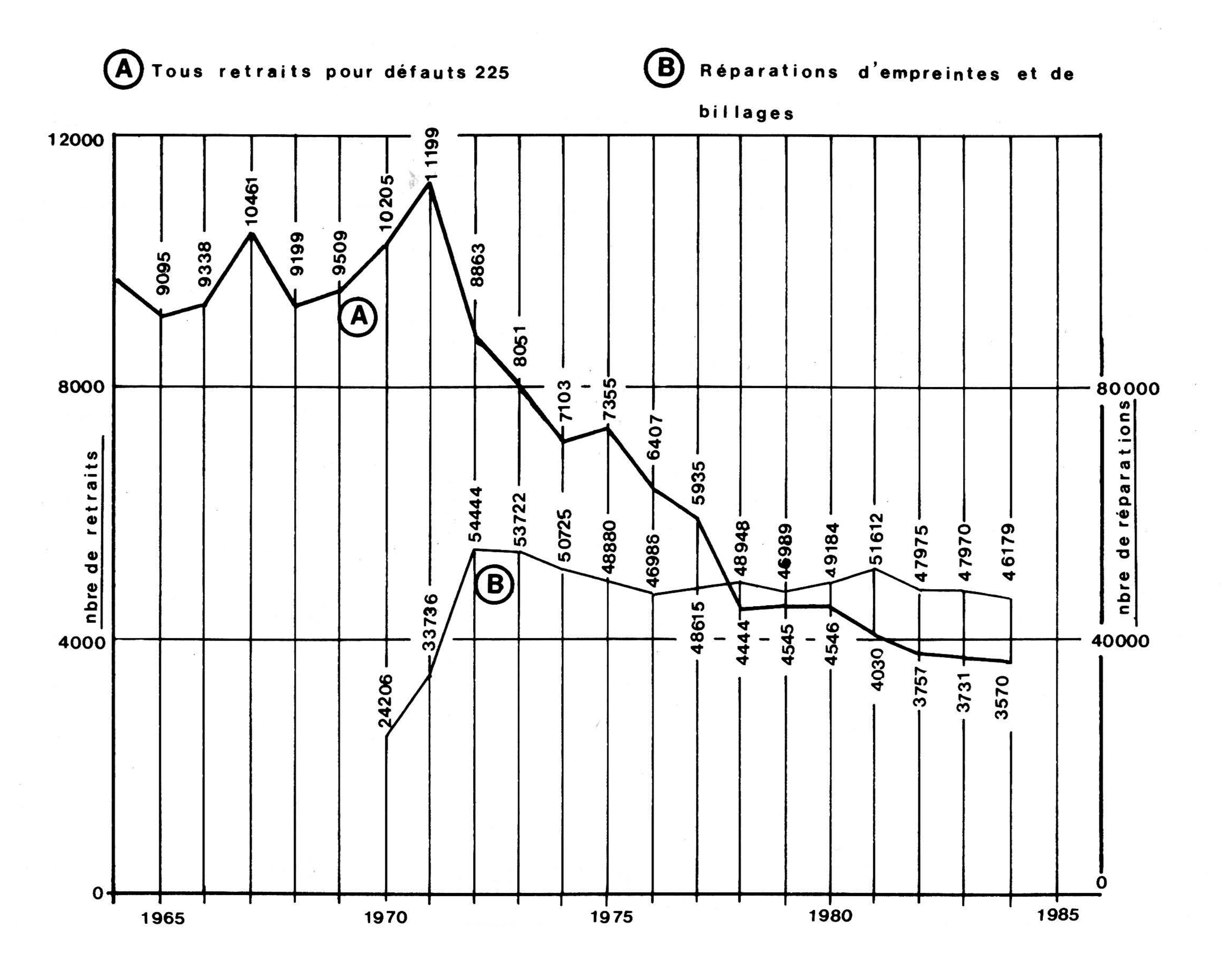


Fig. 151 A/B/C/D. — *Statistiques des défauts de rails caractéristiques sur la SNCF*


nbre de retraits
Km de voie
1500
1260
1000
500
0
40000
30000
20000
1965
70
75
80
FISSURATIONS HORIZONTALES
LONGUEUR DE VOIE EQUIPEE EN BARRES ECLISSEES
1260
1400
1340
1385
1510
1340
1340
1420
1210
966
890
882
603
507
460
384
289
241
214
173
38489
36965
34389
33407
31932
31171
30158
28094
26988
25858
24806
23965
22971
22205
20997
19359
18880
18283
17490
16600
B


1305
1223
1205
1215
1063
1000
SHELLING
942
892
Nombre de retraits
749
SHELLING
539
543
537
512
500
450
428
445
383
364
367
366
305
0
1965
70
75
80

C


A Tous retraits pour défauts 225
B Réparations d'empreintes et de billages
nbre de retraits
nbre de réparations
12000
8000
4000
0
80000
40000
0
1965
1970
1975
1980
1985
9095
9338
10461
9199
9509
10205
11199
8863
8051
7103
7355
6407
5935
4444
4545
4546
4030
3757
3731
3570
24206
33736
54444
53722
50725
48880
46985
48615
48948
46989
49184
51612
47975
47970
46179
A
B

D

2.2. Catalogue UIC des défauts de rails

2.2.1. Le catalogue distingue les rails présentant des défauts en rails rompus, fissurés ou avariés :

Rail rompu : tout rail séparé en deux morceaux ou plus ou tout rail dont un fragment de métal s'est détaché en provoquant sur la table de roulement une lacune de plus de 50 mm de longueur et 10 mm de profondeur.

Rail fissuré : tout rail présentant, en un point quelconque de sa longueur et quelles que soient les parties intéressées du profil, une ou plusieurs solutions de continuité, d'orientation quelconque, visibles ou non, dont le développement risque d'entraîner une rupture à échéance plus ou moins rapprochée.

Rail avarié : tout rail, ni fissuré, ni rompu, mais qui présente d'autres défauts généralement situés en surface.

Il distingue également, pour situer les défauts, les abouts (partie située au droit des éclisses), la pleine barre et la zone de soudure (10 cm de part et d'autre de l'axe de la soudure). Il les répartit en défauts dus à la fabrication, à l'utilisation ou à l'une ou à l'autre.

2.2.2. Les défauts sont codés d'après le schéma du tableau 26.

SCHÉMA DE LA CODIFICATION DES DÉFAUTS DE RAILS

1er chiffre	2e chiffre	3e chiffre	4e chiffre
Situation : 1. Abouts des rails 2. Pleine barre	**Emplacement :** 0. Section complète 1. Intérieur du champignon 3. Ame 5. Patin	**Orientation** 1. Transversal 2. Horizontal 3. Vertical longitudinal 4. Corrosion 5. Passant par un trou 6. Ne passant pas par un trou 9. Repliure	Caractéristiques et différenciations complémentaires
	2. Surface du champignon	0. Usures 1. Défauts de surface 2. Écaillage 3. Écrasement 4. Dénivellation locale 5. Empreintes de patinage	
3. Défauts provoqués par des dommages au rail	**Emplacement :** 0. Section complète	**Origine, cause :** 1. Blessures accidentelles 2. Usinages intempestifs 3. Déformations permanentes	(pas de 4e chiffre)
4. Défauts des soudures et rechargements	**Genre de soudures :** 1. Electrique par étincelage 2. Aluminothermique 3. Electrique à l'arc 4. Oxyacétylénique (autogène) 5. Au gaz par pression 6. Par induction 7. Rechargements 8. Soudures diverses	**Orientation, nature :** 1. Transversal 2. Horizontal ou écaillage	Caractéristiques et différenciations complémentaires

TABLEAU 26

C'est ainsi que les principaux défauts que nous venons d'analyser reçoivent les codifications suivantes :

100-200	rupture franche sans cause apparente
122	écaillage d'about
133-233	retassure de l'âme
135	étoilure de trou d'éclisse
153-253	fente au patin
211	tache ovale du champignon
112-212	fissuration horizontale du champignon
113-213	fissuration verticale longitudinale
225	empreinte de patinage
234-254	corrosion
2201-2202	usure ondulatoire
2203	usure latérale
2222	shelling
301-302	blessures accidentelles, usinage intempestif
411-412	fissuration de soudure électrique
421-422	fissuration de soudure aluminothermique
471-472	fissuration de rechargement.

Pour chaque type de défaut répertorié, le catalogue en donne une description précise, met en garde contre les confusions possibles et indique les moyens de détection et les mesures à prendre (mise en observation, réparation ou remplacement de tout ou partie du rail concerné).

Les défauts sont répartis de la façon suivante :

Défauts dus à la fabrication :

111, 112, 113, 121, 124, 133, 139, 153, 211, 212, 213, 221, 2221, 224, 232, 233, 236, 239, 253.

Défauts dus à l'utilisation :

122, 123, 125, 134, 135, 154, 2205, 225, 234, 235, 254, 301, 302, 303.

Défauts attribuables soit à la fabrication, soit à l'utilisation :

100, 132, 200, 2222, 223.

Défauts de soudure et avaries de rechargement :

411, 412, 421, 422, 431, 432, 471, 472, 481.

L'annexe 1 de la fiche 712 R de l'UIC donne un tableau de correspondance des numérotations UIC et OSJD des avaries de rails.

2.3. Faciès des cassures

2.3.1. Les cassures sont normalement constituées par une multitude de petites facettes correspondant aux plans de clivage des ensembles cristallins lors de la rupture, cet aspect étant qualifié par le terme de cassure ''à grains''.

Les ruptures non fragiles ou ductiles sont caractérisées par l'absence de facettes de clivage et par leur aspect velouté (cassures à nerf). Pratiquement, dans les ruptures de rails en voie, on n'observe jamais de telles cassures.

2.3.2. On dénomme ruptures fragiles celles dont le faciès de cassures est exempt de toute anomalie et semi-fragiles celles qui comportent des anomalies quelconques, en particulier la présence de défauts généralement à l'origine de la propagation de la rupture.

Suivant qu'il y a ou non propagation de la fissure, on distingue :

— les ruptures vives à propagation instantanée (ruptures fragiles et semi-fragiles) suivant un plan de section droite (fig. 152),

— les ruptures progressives se développant à partir de défauts amorces du fait des sollicitations répétées.

Ce sont ces dernières qui constituent la grande majorité des cas.

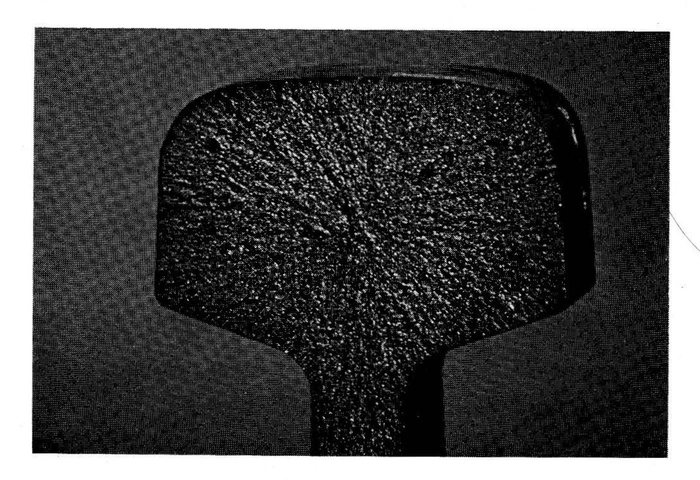


Fig. 152. — *Rupture fragile*

2.3.3. La partie la plus foncée de la cassure est la plus ancienne ; elle en est donc l'origine.

Dans de nombreux cas, la cassure autour de l'origine présente un aspect lisse du fait du polissage mutuel de ses faces sous l'action des contraintes alternées dues au passage des circulations. En particulier, dans les fissurations transversales internes (taches ovales) où l'origine est ponctuelle, la fissuration présente un poli caractéristique entouré d'ondulations autour du défaut amorce et de rides représentant la trace des ondes de propagation.

L'aspect général de la cassure permet généralement d'en situer l'origine soit par la présence des fissurations progressives pour les ruptures de ''fatigue'', soit dans le cas de cassures entièrement grenues pratiquement instantanées, par l'orientation des chevronnements d'où la cassure semble rayonner.

2.4. Soumis à un traitement brutal, les rails peuvent présenter des défauts dégénérant parfois en ruptures. Jusque vers les années 1930, certaines ruptures de rails en voie ont entraîné dans de nombreux pays des catastrophes ferroviaires restées dans les mémoires. Malgré l'augmentation des charges et des vitesses, les conséquences de ces ruptures sont de moins en moins fâcheuses pour un certain nombre de raisons :

— amélioration de la qualité de l'acier à rail,
— grande rareté des défauts multiples, une lacune, même de plusieurs dizaines de centimètres, étant en outre le plus souvent franchie sans dommage,
— développement de moyens d'auscultation efficaces,
— meilleure qualité générale de la voie,
— généralisation des circuits de voie qui permettent un arrêt des trains en temps utile devant une rupture,
— conception actuelle de résistance au choc du matériel et en particulier des voitures de voyageurs.

Le rail, pièce unique de sécurité, présente certes toujours un risque, mais bien moindre qu'autrefois. Mais une rupture, voire un défaut, sont presque toujours à l'origine de perturbations graves dans la circulation des trains et en ce domaine mieux vaut donc ''prévenir que guérir''. Les ruptures sont inégalement réparties dans le temps, les

tractions qui s'exercent dans les rails en hiver, surtout dans les LRS, étant particulièrement favorables aux ruptures : mais c'est lors des premiers froids (0°) qu'elles se manifestent le plus souvent, car il est logique que l'augmentation brutale des contraintes de traction qui se produit alors soit fatale aux défauts en cours de développement.

3. Les défauts

3.1. Nous allons maintenant examiner les différents types de défauts schématisés sur le tableau de la figure 153 les rapportant à la numérotation du catalogue UIC.

3.2. Défauts dus à la fabrication

3.2.1. Fissuration transversale progressive d'origine interne (défauts Nos 111 - 211)

3.2.1.1. Les défauts d'origine interne sont liés au déroulement des opérations d'élaboration de l'acier et aux procédés employés. Les inclusions non métalliques qui se forment au cours de la fabrication, peuvent, lorsque la température de l'acier liquide est trop basse au moment du remplissage des lingotières, ne pas avoir la possibilité de décanter. Elles se retrouvent donc dans l'acier après solidification. Lorsque ces inclusions atteignent une certaine dimension, ou lorsqu'elles forment des amas dans le champignon, à une profondeur voisine de celle où le cisaillement est maximal, c'est-à-dire entre dix et quinze millimètres de la surface de roulement, elles provoquent des fissurations transversales internes ou "taches ovales" (2) (fig. 154) qui se développent par élargissement progressif : on observe des zones concentriques qui marquent la progression de la fissure. Si ces défauts ne sont pas détectés à temps, ils entraînent à coup sûr la rupture du rail. Ces taches, comme on l'a évoqué dans un chapitre précédent se développent toujours dans un plan faisant un angle de 30° avec la verticale dans le sens de la marche (3). Le critère de Dang-

---

(2) On a aussi appelé ce défaut tache ovale argentée du fait de sa forme et de l'aspect brillant de la fissure qui est totalement à l'abri de l'oxydation de l'air.

(3) Sur les lignes à voie unique, ces défauts peuvent présenter un faciès particulier avec des décrochements successifs à ± 30° sur la verticale.

N° Code	Designation	Avarie	Rupture
112	fissuration horizontale d'about		
113	Fissuration verticale du champignon à l'about		
132	Fissuration horizontale aux congés		
133	Fissuration verticale a l'about Retassure		
135	Fissurations radiales autour des trous d'éclissages		

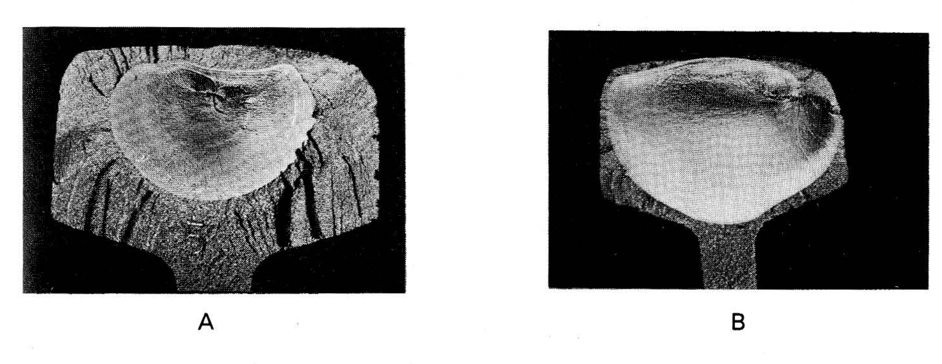
Fig. 153. — *Schémas des principaux défauts*

Nº code	Désignation	Avarie	Rupture
211	Fissuration transversale interne du champignon		
212	Fissuration horizontale du champignon		
213	Fissuration verticale du champignon		
2222	Ecaillage du congé de roulement Shelling		
224	Dénivellation locale (crapaud)		
225	Empreintes répétées de patinages		

(suite Fig. 153)

Nº Code	Désignation	Avarie	Rupture
231 232 2322	Fissuration de l'âme		
253	Fente longitudinale du patin		

(suite Fig. 153)



A B

Fig. 154 A/B. — *Fissuration transversale du champignon*

Van montre en effet que les plans orientés à 30° sont les plus défavorables, car ce sont ceux sur lesquels l'amplitude du cisaillement est maximale.

La fig. 155 schématise le développement de ces fissures, les rapports $\frac{C}{a_1}$ et $\frac{C}{a_2}$ étant respectivement voisins de 1 et 3, ce qui montre un développement plus rapide vers l'âme que vers la surface de roulement.

Ces fissures sont d'autant plus dangereuses qu'elles ne s'accompagnent pas, au cours de leur développement, d'altération visible de la surface de roulement ou des joues du champignon : elles ne débou-

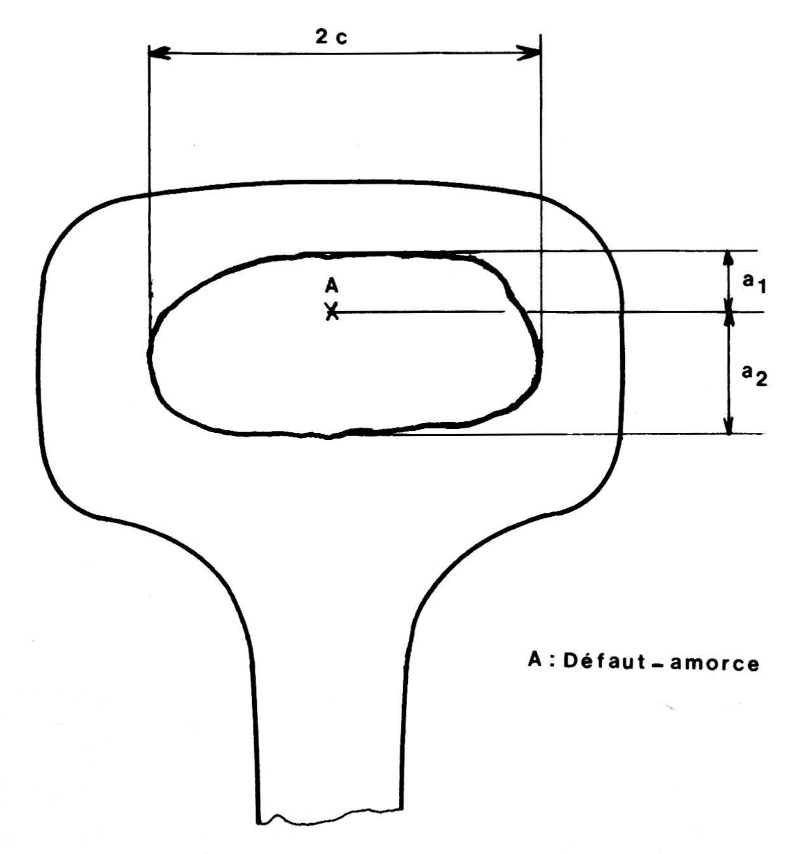


Fig. 155. — *Schéma de développement de la tache ovale*

chent que lorsque ce dernier est presque complètement fissuré, mais la rupture est alors imminente : un contrôle non destructif systématique en voie est donc indispensable. Dans les rails d'ancienne fabrication, ces fissures peuvent s'amorcer sur des inclusions disséminées dans le lingot ; elles peuvent donc se développer presque simultanément en plusieurs points de la même barre, d'où risque de rupture multiple, en général synonyme de déraillement. En cas de découverte de tache ovale dans un rail de ce type de fabrication, il est donc hautement recommandable de procéder au remplacement de la totalité de la barre élémentaire concernée. Le caractère épidémique des défauts lié à une certaine fabrication peut d'autre part justifier dans certains cas un contrôle non destructif systématique de tous les rails de même origine d'où l'intérêt tout particulier de l'existence d'un fichier ''rails'' à jour permettant de retrouver presque instantanément la localisation de toute la population de rails intéressés.

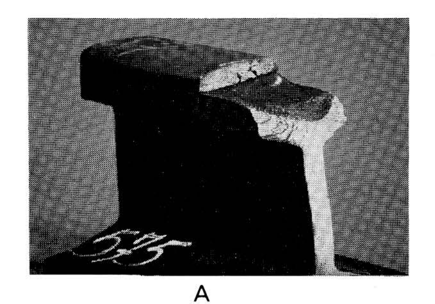
L'amélioration du procédé de fabrication sur laquelle nous avons particulièrement insisté, la progression de l'emploi de rails durs dont l'élaboration exige beaucoup de soin, y compris dans les poses en alignement ainsi que le contrôle ultrasonore en usine de la totalité des rails par le procédé Ralus ont fait disparaître le risque de démultiplication du défaut. C'est pourquoi il n'est plus nécessaire, dans le cas de rails de fabrication récente, de procéder à la substitution de la totalité de la barre élémentaire en cas de découverte d'une tache ovale : un contrôle ultrasonore de la barre est amplement suffisant pour se prémunir contre le risque de rupture multiple.

3.2.1.2. La tache ovale peut se rencontrer également dans les rails dont la résistance à la rupture dépasse 850 N/mm², mais là encore essentiellement dans des rails de fabrication ancienne. Le défaut est amorcé, non plus sur des inclusions, mais sur des criques provoquées par la présence d'hydrogène en "flocons". L'acier liquide dissout l'hydrogène en toutes proportions. Malheureusement dès que la teneur en carbone dépasse 0,5 à 0,6 %, l'acier en cours de solidification n'a plus la possibilité de retenir ce gaz en solution. Un refroidissement trop rapide empêche alors l'effusion de l'hydrogène qui échappe au réseau cristallin du fer : il crée localement des pressions très élevées qui entraînent la formation de criques dans le métal. Lorsque ces criques sont situées dans la zone de cisaillement maximal, elles engendrent, comme les autres inclusions non métalliques, des fissurations transversales progressives ayant un caractère de tache ovale. Rappelons que pour éviter ces risques plusieurs mesures peuvent être prises :

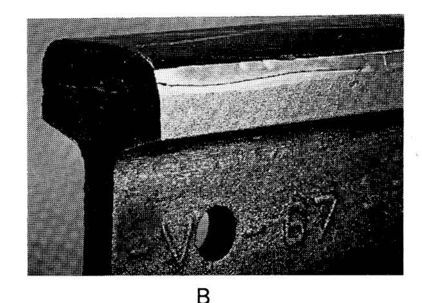
— soit favoriser l'effusion de l'hydrogène en imposant aux blooms ou aux rails un refroidissement très lent (refroidissement contrôlé) dans la zone de température allant de 800 à 500° ; ceci est actuellement réalisé en maintenant empilés les paquets de rails pendant un temps suffisant dans des enceintes calorifugées,
— soit dans le cas de certaines aciéries électriques, n'employer que des matières exemptes d'humidité (ferraille préchauffée, chaux parfaitement sèche) et conduire l'élaboration dans le four de façon à limiter au maximum les échanges gazeux entre le métal liquide et l'atmosphère,
— soit enfin, ce qui est de loin la meilleure solution, éliminer l'hydrogène dissous par traitement sous vide ou brassage à l'argon du contenu de la poche de coulée.

3.2.2. Fissuration horizontale (défaut Nos 112/212)

Ce défaut est particulièrement sensible dans les rails de nuance 70 qui sont de nature ferrito-perlitique et où les amas d'inclusions peuvent entraîner des fissurations de faciès horizontal. En effet, les impuretés servent de germe à la précipitation de la ferrite au cours de la solidification des lingots. Il en résulte une structure constituée par une alternance de couches de ferrite dans lesquelles sont enchâssées les inclusions et de perlite. Les défauts se développant dans les couches de moindre résistance, c'est-à-dire dans la ferrite prennent alors la forme de fissurations horizontales du champignon (fig. 156) qui,



A



B

Fig. 156 A/B. — *Fissuration horizontale*

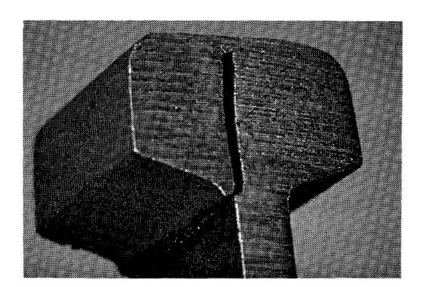


Fig. 157. — *Fissuration verticale longitudinale*

à partir d'un certain stade d'évolution, s'accompagnent d'une dénivellation de la table de roulement, avant de déboucher sur une joue du champignon. Peu dangereuses en elles-mêmes, ces fissures qui progressent en général lentement et peuvent par conséquent être détectées en temps utile, bifurquent brusquement vers le bas, dans certains cas, en dégénérant en fissures transversales : ceci peut se produire par exemple si la fissure vient buter sur une inclusion suffi-

samment importante. Les fissurations horizontales au raccord âme-champignon (défaut 1321 ou 2321) ou au raccord âme-patin (défauts 1322 et 2322) sont toujours dangereuses, qu'elles se manifestent aux abouts ou en pleine barre, car après un premier stade de développement horizontal, elles obliquent vers le bas ou vers le haut, trouvent dans le cas des abouts un trajet préférentiel qui passe par les trous d'éclissage et se terminent toujours par une cassure du rail en plusieurs morceaux.

A l'about, la fissuration horizontale peut se traduire par un écaillage plus ou moins important.

3.2.3. Fissuration verticale longitudinale (défaut Nos 113/213)

Le défaut tend à séparer le champignon en deux parties selon un plan parallèle à l'âme du rail (fig. 157). Quand le défaut atteint la surface du champignon, il se traduit par une ligne noire qu'il ne faut pas confondre avec les lignes, qui sont de très faible profondeur et sans gravité. On observe généralement un affaissement et un élargissement du champignon traduisant l'ouverture de la fissure qui peut, dans certains cas, déboucher au congé du raccordement âme-champignon. Ce défaut, très rare dans les fabrications récentes, nécessite un retrait rapide du rail.

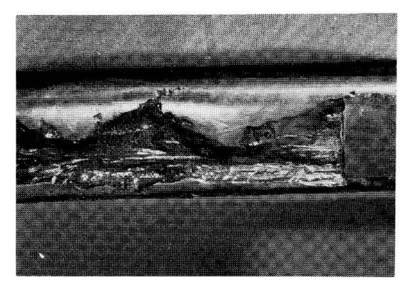
3.2.4. Défauts de surface (défaut Nos 121/221) (fig. 158/159/160)

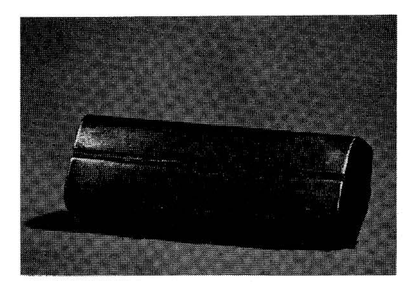
Ces défauts présentent trois aspects caractéristiques :

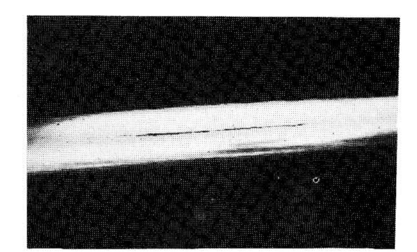
— les pailles, lamelles de métal minces et plates se détachant en surface,
— les gouttières ou sillons : une baguette de métal de faible section constante (quelques mm²) se détache sur une longueur pouvant atteindre plusieurs mètres,
— les lignes, défaut longitudinal filiforme de très faible profondeur ($\geqslant$ 3 mm) et disparaissant souvent sous l'action du roulement des trains, après la pose.

3.2.5. Dénivellation locale de la table de roulement (défaut Nos 124/224)

Ce défaut rare se traduit par un affaissement localisé du champignon accompagné d'un élargissement. L'origine en est le plus souvent très difficile à déterminer.


Fig. 158. — *Paille*


Fig. 159. — *Gouttière*


Fig. 160. — *Ligne*

3.2.6. Retassure (défaut Nos 133/233)

Au chapitre fabrication, on a vu que la contraction qui accompagne la solidification de l'acier se traduit par la formation d'une cavité appelée retassure vers le centre de la partie supérieure du lingot et normalement éliminée par le chutage de cette partie. Il arrive cependant que la retassure soit constituée d'une série de petites cavités disséminées dans la partie axiale du lingot (''retassure en chapelet''). Comme la zone retassée se solidifie en dernier lieu, les parois de ces cavités sont tapissées d'inclusions qui empêchent tout soudage des faces en présence au cours du laminage. Les chapelets de retassure se retrouvent donc sous forme de petites dédoublures axiales de l'âme du rail, environnées d'un nuage d'impuretés (fig. 161). Ces dédoublures associées au phénomène physique de solidification ne sont pas considérées comme dangereuses sauf dans la mesure où leur présence peut aggraver l'évolution d'une fissure située au voisinage et conduire à des fractures multiples. Le procédé d'élaboration par coulée continue a permis de faire disparaître la retassure dans les blooms.

3.2.7. *Repliure (défaut Nos 139/239)*

La repliure, ligne horizontale en général située sur l'âme ou près du congé de raccordement âme-champignon est due à un débordement de métal au moment du laminage ; ce défaut très rare peut présenter un certain caractère de gravité.

3.2.8. *Fente au patin (défaut Nos 153/253)*

Ce défaut (fig. 162) dangereux et indétectable visuellement ou par contrôle non destructif n'affecte que des rails anciens, laminés sans cannelure fendeuse. Des lignes de soufflure ou de porosité situées

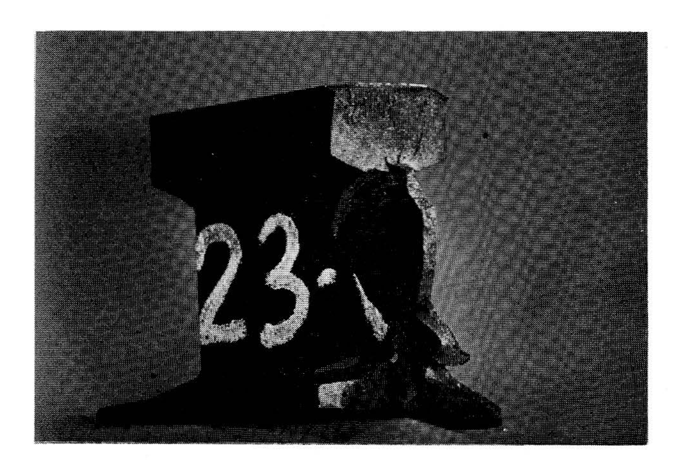


Fig. 161. — *Dédoublure d'âme*

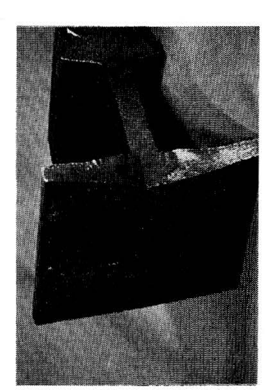


Fig. 162. — *Fente au patin*

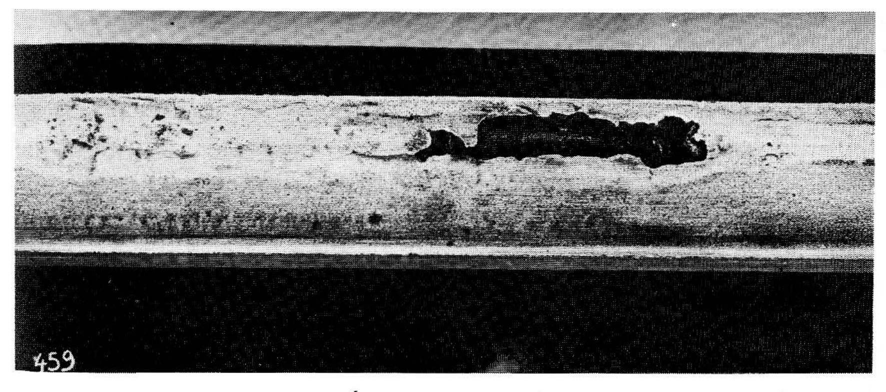


Fig. 163. — *Écaillage de la table de roulement*

en peau de la surface inférieure du patin, peuvent créer dans la zone centrale la plus sollicitée une amorce de fissure longitudinale. Lorsque la fissure est légèrement excentrée, il y a rupture d'un morceau de patin, sinon cassure oblique du rail, de caractère explosif, en général par temps froid. Ce défaut revêt un caractère épidémique.

3.2.9. Écaillage de la table de roulement (défaut N° 2221)

Ce défaut intéresse des rails de fabrication ancienne dont la surface du champignon a été traitée thermiquement. La faible usure amène une concentration de contrainte dans la zone de plus fort cisaillement, zone de transition de la partie traitée. Le défaut se traduit par l'apparition d'une usure pseudo-ondulatoire suivie de la formation d'écailles (fig. 163) d'un centimètre environ d'épaisseur moyenne et pouvant atteindre plusieurs dizaines de centimètres de longueur. Peu dangereux en lui-même, ce défaut, épidémique, crée une surface de roulement tellement chaotique que le remplacement du rail s'impose.

3.2.10. Fissuration aux congés de raccordement (défaut N° 232)

Les fissures horizontales prenant naissance aux congés de raccordement âme-champignon ou âme-patin, se propagent horizontalement puis bifurquent vers le bas ou le haut, amenant une rupture de l'âme et du profil. Ces défauts sont en fait très rares. Certaines fissurations (défaut N° 236) partent directement en diagonale le long de l'âme amenant finalement la séparation du champignon ou du patin.

3.3. Défauts dûs à l'utilisation

3.3.1. Ces défauts peuvent provenir des circulations elles-mêmes, de l'environnement ou de blessures, manutentions ou usinage intempestifs. Il est bon de signaler le rôle néfaste qui peut être joué par des méplats de roues trop importants pouvant entraîner soit des ruptures fragiles, soit des ruptures semi-fragiles à partir de défauts de faible importance.

Les instructions relatives à la surveillance du matériel roulant fixent

une tolérance pour les méplats des bandages qui est de 1 mm pour les voitures et de 3 mm pour les wagons, mais il arrive que ces tolérances soient accidentellement dépassées et il suffit d'un seul véhicule affecté d'un méplat important pour déterminer des ruptures en série sur un même tronçon de ligne ; c'est ainsi que sur Montpellier-Nîmes, le 30 janvier 1947, une voiture dont un bandage comportait un méplat de 20 mm sur 18 cm de longueur a provoqué 267 ruptures de rails particulièrement fragiles. La température (− 10°) qui régnait a aggravé l'effet du méplat, la fragilité de l'acier dur augmentant très rapidement à basse température. La qualité actuelle de l'acier ne permet fort heureusement plus de tels incidents.

3.3.2. Écaillage ou écrasement d'about (défaut Nos 122/123)

Ces défauts proviennent du passage des roues sur des joints mal entretenus : ouverture incorrecte, éclisses usées ou mal serrées, traverses de joints encastrées ou danseuses, joint boueux, etc. S'ils ne sont pas trop importants, ils sont rechargeables par soudure à l'arc. Il convient cependant d'intervenir assez rapidement.

3.3.3. Empreintes de patinage (défaut Nos 125/225)

Ce défaut est, de loin, le plus important que l'on puisse rencontrer sur les voies modernes avec les taches ovales.

Les empreintes de patinage (fig. 164) sont soit isolées, soit concentrées dans les zones de démarrage des trains (à l'amont de signaux par exemple). Le frottement du bandage sur le rail produit une élévation locale de température qui par suite de la diffusion très rapide de la chaleur dans le champignon entraîne un phénomène de trempe. Cette tache peut disparaître ou dégénérer en fissuration horizontale ou verticale. Dans le premier cas il se développe une fissuration légèrement inclinée sur l'horizontale et qui conduit à un écaillage local qui n'évolue pas en profondeur, mais à un affaissement local de la table de roulement soumis au choc répété des essieux. Mais la fissuration peut bifurquer verticalement et il y a évolution plus ou moins rapide vers une rupture au faciès caractéristique (fig. 165). Les crapauds de patinage doivent donc faire l'objet d'une surveillance jusqu'à réparation. Si le patinage est très important, il peut y avoir fusion de tout ou partie du champignon du rail et incrustation de la roue de plusieurs millimètres. Les réparations par soudage à l'arc des emprein-

tes de patinage apportent à ce genre de défaut un remède très économique et excellent sur le plan de la qualité tout au moins pour le premier cas.

Dans le cas de patinage répété, on observe un véritable tartinage du rail ou la présence d'un réseau de très fines craquelures (fig. 166) relativement profondes dues à la superposition de phénomènes répétés d'autotrempe et d'écrouissage et souvent à l'origine de ruptures par temps froid.



Fig. 164. — *Empreinte de patinage*

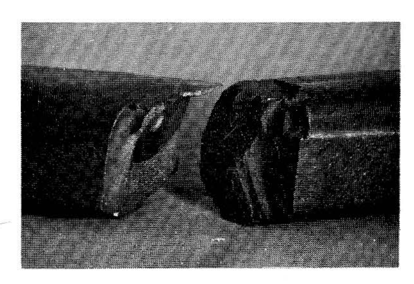


Fig. 165. — *Rupture sous empreinte non écaillée*

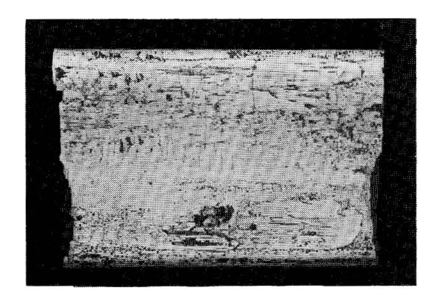
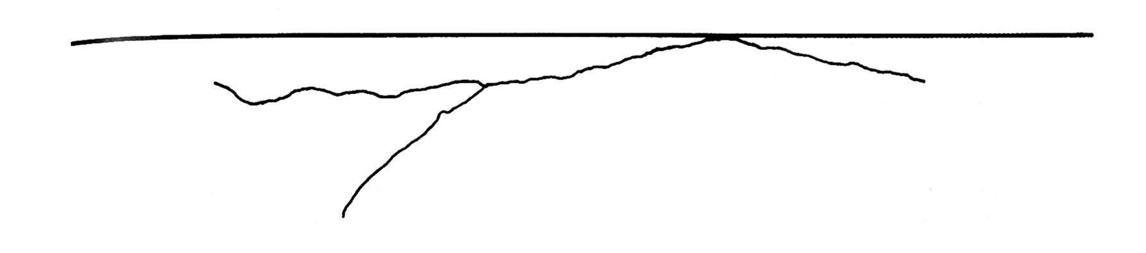


Fig. 166. — *Tartinage*

C'est à ce type de défaut qu'il convient de rattacher celui mentionné assez fréquemment dans la littérature anglo-saxonne sous le nom de "squat". Il s'agit d'une fissure démarrant à la surface de roulement qui se propage soit dans le sens de roulement, soit en sens inverse, soit dans les deux sens suivant un angle de 10 à 15° sur l'horizontale (fig. 167). A quelques millimètres de la surface, la fissure se propage vers le bas avec parfois des bifurcations ; elle se termine soit en écaillage, soit le plus souvent en fissure transversale.

En fait, cette avarie déjà rencontrée en France démarre sur un défaut amorce (patinage ou blessure) souvent imperceptible. Son danger réside, outre le risque de rupture, dans son caractère de multiplicité.



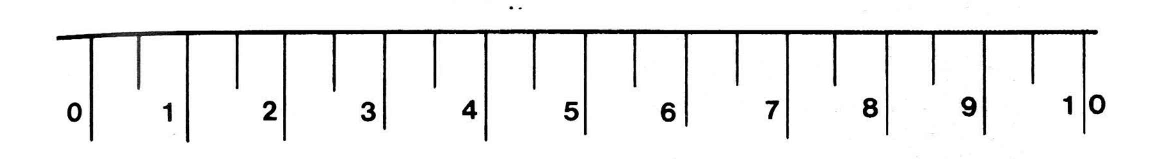


Fig. 167. — *Squat*

3.3.4. Étoilure autour de trous percés dans l'âme (défaut N°s 135/235)

Ce défaut intéresse bien sûr au premier chef les trous d'éclissage. Les étoilures (fig. 168) se développent toujours à partir du bord du trou suivant des inclinaisons de ± 45 % sur l'horizontale par rapport à l'axe longitudinal du rail. Non détectées à temps, elles se propagent jusqu'au champignon et au patin, entraînant des déchirures de l'acier et des fracturations des abouts. Ce défaut a pratiquement disparu sur les réseaux qui, comme la SNCF, n'utilisent plus que des trous alésés du plus petit diamètre possible (23 mm). Des essais de laboratoire effectués en Belgique ont montré que le nombre d'alternances d'efforts nécessaires pour provoquer l'amorçage de la fissuration variait en raison inverse du diamètre des trous, mais il est certain que l'alésage de trou joue un rôle favorable très important.

3.3.5. Usure (220)

L'usure joue un rôle économique très important : elle revêt deux aspects :

— l'usure verticale et l'usure latérale en courbe dont nous avons examiné l'évolution et les effets dans un chapitre précédent,

— l'usure ondulatoire, courte ou longue, dont le caractère spécifique sera traité dans un chapitre ad hoc.

3.3.6. Corrosion (défaut Nos 134/154/234/256)

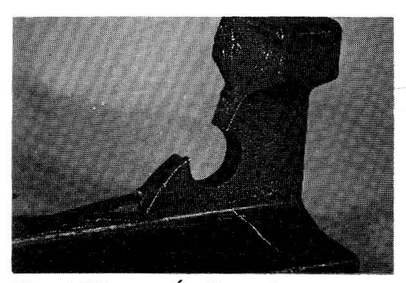
C'est un défaut découlant essentiellement d'un environnement agressif dû pour une grande part à la formation de piles locales résultant d'hétérogénéités physiques ou chimiques du métal en présence d'électrolytes. On peut classer en trois catégories les phénomènes de corrosion :

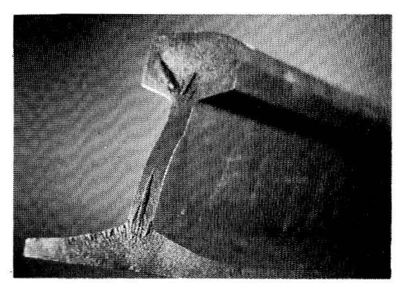
— dans les souterrains humides, il peut se produire une attaque de nature purement chimique de l'ensemble du profil avec formation de plaques d'oxyde hydraté Fe_2O_3 $(3H_2O)$ et $Fe_3O_4H_2O$; cette corrosion autrefois favorisée par les fumées acides émises par les locomotives à vapeur est particulièrement vive au contact entre patin du rail et traverses et elle est favorisée dans les congés de raccordement de l'acier avec le patin ou le champignon du fait de la présence de contraintes résiduelles (phénomènes de corrosion sous contrainte). Ce dernier type de défaut pouvant entraîner une fragmentation multiple du rail est particulièrement dangereux. Enfin, cette nature de corrosion est particulièrement sensible dans les voies où la traction est assurée par traction électrique,

— en pleine voie, dans des zones particulièrement humides et où le ballast est pollué, il peut se produire des piqûres de corrosion sous le patin à l'aplomb des traverses. Ces piqûres indécelables du fait de leur position et leur très faible dimension, peuvent évoluer rapidement en fissure de fatigue puis en rupture transversale (fig. 169).

Les mesures en continu de tension rail-sol à l'aide d'un engin spécialement équipé peuvent permettre de déterminer les zones douteuses.

Dans des souterrains humides et boueux, plus particulièrement dans les zones de démarrage en traction électrique, on a pu cons-


Fig. 168. — *Étoilure de trou d'éclissage*


Fig. 169. — *Piqûre de corrosion au patin*

tater une dissolution électrolytique aux points de contact du patin avec les tirefonds ou avec des remontées de glaise ; seul un assainissement sérieux de la plateforme est en mesure de prévenir de tels dégâts, particulièrement sensibles au droit des tirefonds (encochage du patin) ou aux bords du patin en contact avec de la glaise.

3.3.6.2. La lutte contre la corrosion se situe d'abord dans le cadre d'un excellent état de l'étanchéité de la plateforme et de la voûte dans les souterrains, lieux privilégiés de ce genre de défauts. Il est cependant possible dans les souterrains particulièrement humides de retarder les effets de la corrosion par une protection des rails. Le traitement optimal consiste à les sabler et à les métalliser par projection au fil fondu sur une épaisseur d'environ 100 μ d'un mélange de 85 % de zinc et 15 % d'aluminium puis à les recouvrir d'une peinture. On peut également utiliser une protection plastique (rilsan ou polythène).

Ces revêtements efficaces, mais onéreux, peuvent être remplacés par de la peinture à base de zinc après sablage (75 μ d'épaisseur ou par de la peinture bitumineuse qui évite le sablage.

On peut faire choix de la solution la plus économique en sachant qu'une application de peinture (15 à 20 % du prix du rail au mètre linéaire) prolonge d'environ 3 ans la vie du rail, tandis qu'après sablage, peinture et métallisation, on prolonge la vie du rail de 7 ans pour un surcoût de 0,4 à 0,5 fois son prix. On peut également faire une comparaison avec la solution du rail à âme plus épaisse sachant que l'usure de l'acier corrodé est de l'ordre de 3 mm en 10 ans contre 1 mm pour des rails protégés. L'annexe 3 donne le schéma d'un calcul de rentabilité possible. Enfin, des essais effectués par la SNCF ont montré la faible incidence de la qualité de l'acier à rail sur le développement de la corrosion, les aciers traités thermiquement y étant cependant un peu moins sensibles : le développement plus lent des fissures les rend d'ailleurs plus aptes à résister aux ruptures par piqûres de corrosion.

3.7. **Blessures accidentelles** *(défaut N° 301)* **et usinages intempestifs** *(N° 302)*

Toute blessure (coup de masse sur une aile du patin, arc électrique, griffures de manutention) peut conduire, surtout lorsqu'elle affecte une zone fortement sollicitée, à une rupture brutale. C'est pourquoi les masses utilisées pour frapper le rail lors de la libération des contraintes de LRS doivent être en bois ou en cuivre et les fixations mises en place à la masse (crampon, fit and forget) sont à ce point de vue sujettes à caution.

Les bandages peuvent également être à l'origine de blessures par exemple par incrustations ou billages. Ces défauts, graves par les répétitions et les amorces de fissures transversales qu'ils peuvent entraîner dans les rails sont, s'ils sont pris à temps, réparables par soudure à l'arc en chantier organisé.

Chaque rail doit en fait être manipulé avec soin et protégé de tout amorçage d'arc accidentel. A ce genre d'incidents peuvent être rattachées les fissurations amorcées sur des trous situés dans l'âme. Un perçage mal exécuté, avec un foret en mauvais état, sans ébavurage ni chanfreinage des bords du trou peut conduire à une étoilure ou à une fissuration longitudinale de l'âme. A cet égard, le perçage de trous au chalumeau doit être formellement prohibé. Il est recommandé, d'une façon générale, d'éviter de percer des trous et si l'on ne peut faire autrement, d'en limiter le diamètre et de les exécuter avec le plus grand soin.

3.8. **Rails faussés** *(défaut N° 303)*

Les rails sont faussés au cours de manutentions peu soignées. S'ils entraînent en barres normales des défauts de dressage, ils peuvent en LRS provoquer une contrainte de déstabilisation latérale et sont donc particulièrement redoutables.

Il est possible en voie de redresser à la presse à main les rails faussés, mais il est plus souhaitable d'effectuer cette opération en atelier, tout au moins si le défaut est suffisamment peu prononcé pour ne pas entraîner d'écrouissage intempestif.

4. Avaries dues à la fabrication ou à l'utilisation

4.1. Rupture franche sans cause apparente
(défaut N°s 100/200)

Il s'agit de ruptures transversales brutales à caractère fragile dont il n'est possible de déterminer ni la cause, ni le point origine. Ce type de ruptures se produit généralement par temps froid et intéresse surtout des aciers peu résilients. Des méplats de roues peuvent cependant être à l'origine de ces ruptures.

4.2. Fissuration d'about au congé de raccordement âme-champignon ou âme-patin *(défaut N° 132)*

Contrairement au défaut de pleine barre, imputable à la fabrication, ce défaut peut provenir de l'utilisation. Finissant de se propager à travers le champignon ou le patin, il dégénère le plus souvent en rupture. Cette fissuration traverse fréquemment les trous d'éclissage. Le sondage au marteau, la détection ultra-sonore, l'examen visuel périodique d'about en permettent la découverte en temps utile.

4.3. Shelling *(défaut N° 2222)*

4.3.1. Officiellement connu sous le nom de défibrage du congé de roulement, ce défaut est un de ceux qui devient à l'heure actuelle prédominant : à la fois avec l'augmentation des charges par essieu et l'utilisation, principalement en courbe, de rails de plus en plus durs.

Dans le cas des rails située en file haute de courbe, la zone de contact entre le rail et la roue avant d'un bogie circulant sur cette file, normalement située dans le plan de symétrie du rail, se trouve déplacée vers l'arête de roulement. La conjugaison des efforts verticaux et de l'effort de traction appliqué aux essieux moteurs crée sous le congé de la table de roulement des contraintes de cisaillement intenses qui

se traduisent par des cycles élasto-plastiques en des points fixes de la microstructure du métal.

Lorsque le rail est convenablement graissé et qu'il n'y a de ce fait pas d'usure du profil, la répétition dans la même zone de ces cycles de cisaillement peut, si la résistance à la fatigue du métal est diminuée localement par un amas d'inclusions, conduire à une fissuration progressive, par franchissement des droites limites de Dang-Van.

Le seuil de déclenchement des phénomènes s'élève sensiblement avec la dureté du métal.

4.3.2. Dans les rails de nuance normale de structure perlito-ferritique, il se produit alors des défibrages de l'arête de roulement sur une certaine longueur se présentant d'abord sous forme de taches noires étirées le long de cette arête. Ces taches sont l'indice d'une décohésion interne qui évolue en bavure, crevasses et enfin écaillages importants de l'arête (fig. 170). Du fait de la forme des ébréchures rappelant une coquille, ce défaut est généralement connu sous le nom de shelling.

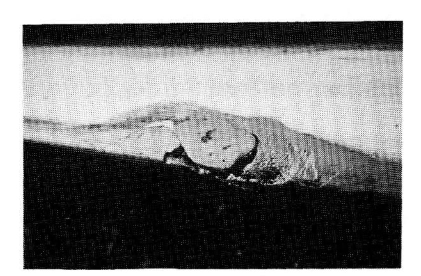


Fig. 170. — *Shelling*

Il y a fissuration longitudinale interne : le fluage et l'écrasement de métal en résultant provoque l'apparition de taches noires provenant de l'absence de contact entre roue et rail. L'analyse d'un rail de fabrication ancienne atteint de shelling montre que la surface d'écaillage présente un type de relief caractéristique comprenant une contremarche longitudinale presque verticale de quelques millimètres de hauteur, composée d'une série de micromarches élémentaires et deux marches longitudinales d'angulation comprise entre 0 et 45°. L'écaillage se produit lorsque ces marches atteignent la surface du rail.

Les inclusions non métalliques, surtout les amas d'alumine, semblent à l'origine de ce phénomène, leur forme, leur position, leur taille, leur répartition étant autant d'éléments qui interviennent dans la formation du shelling. Il est évident que la fissuration se produit d'autant plus facilement que les inclusions constituent, de par leur forme et leur taille, des entailles plus sévères ; d'autre part, leur action ne peut, dans certains cas, intervenir que dans la mesure où l'usure progressive du congé du champignon leur a permis d'atteindre une position correspondant aux contraintes les plus importantes. Mais il n'existe encore aucune information précise sur les dimensions maximales des inclusions permettant d'éviter ce défaut, ni sur les moyens de détection ultrasonore en usine permettant de les mettre en évidence.

Il semble bien que le processus préalable à la formation de la contremarche corresponde à un grand nombre de cycles et soit par conséquent très lent : dans un premier processus, il y a déformation plastique du métal ; la contremarche, puis les deux marches, inférieure et supérieure, se forment ensuite progressivement.

L'examen des stries de fatigue dans les marches, de l'ordre de 2 μ traduit une grande vitesse de fissuration. Cependant, les conditions de formation de cet ensemble de fissures sont mal connues et la SNCF, en accord avec l'IRSID et la sidérurgie a entamé une étude de laboratoire et des analyses in situ permettant de mieux apprécier les conditions de naissance et développement du phénomène, en vue d'en éviter l'apparition.

Les études de la microstructure du métal et de l'impact sur la formation des fissures des séquences de fatigue oligocyclique permettront de mieux appréhender ce phénomène.

L'application du critère de Dang Van jointe aux essais de laboratoire aidera certainement à mieux les représenter et conduira à l'amélioration des moyens de détection en usine des inclusions dangereuses.

Dans les rails de nuance dure, le shelling prend souvent l'aspect de petites fissures filiformes transversales superficielles, inclinées et assez rapprochées. Ce défaut semble s'apparenter au défaut dénommé ''head clucks'' dans la littérature anglo-saxonne. L'évolution du shelling se termine également dans ce cas en ébréchures.

Le shelling n'évolue en rupture que dans le cas où il est conjugué avec un noyau amorce provoquant le développement d'une tache ovale. C'est le type le plus souvent cité dans la littérature américaine.

Ce dernier type de shelling est particulièrement répandu aux États-

Unis du fait des charges d'essieux lourds s'exerçant dans des courbes de faible rayon où le graissage limite l'usure et maintient une contrainte de cisaillement intense à une dizaine de millimètres du congé du champignon à environ 45° sur l'horizontale. Il semble bien en fait qu'un chapelet d'inclusions fines entraîne le shelling de défibrage peu dangereux mais nocif pour le roulement du matériel, tandis qu'une grosse inclusion entraîne la formation d'une tache ovale à évolution rapide et qui doit donc être traitée comme telle.

4.3.3. La littérature américaine signale enfin un défaut appelé ''flaking'' consistant en un léger écaillage de faible profondeur de la table de roulement. Ce défaut, sans gravité, peut parfois être l'annonce d'un futur shelling.

*4.4. **Écrasement du champignon** (défaut N° 223)*

Le métal de la bande de roulement s'écrase et flue sur le côté extérieur du champignon en produisant une bavure. Ce défaut se trouve essentiellement sur la file basse de courbe de faible rayon ou sur des courbes de rayon plus important où circulent des trains lourds soumis à un excès de dévers. L'essai de rails en acier Hadfield par ailleurs difficiles à fabriquer, n'a pas été suffisamment concluant.

5. Défauts de soudure

5.1.1. En dehors des défauts déjà signalés au chapitre ''soudures'' et dus à une malfaçon dans l'exécution, les principales anomalies rencontrées en voie sont les suivantes :

5.1.2. Fissurations transversales de soudure électrique (défaut N° 411)

Ce défaut dont le faciès évoque souvent celui d'une tache ovale se développe dans le plan de la soudure à partir d'un défaut interne situé dans le champignon ou l'aile du patin.

5.1.3. Fissuration horizontale de l'âme (défaut N° 412)

Cette fissure qui prend naissance dans la partie supérieure de l'âme est vraisemblablement due à des effets anormaux exercés en atelier avant refroidissement suffisant de la soudure électrique. Elle bifurque vers le haut ou vers le bas, en forme de demi-cercle entraînant la rupture du patin ou du champignon.

Plus rarement elle peut se développer à partir d'une crique du bourrelet de soudure.

5.1.4. Les défauts correspondants des soudures à l'arc se retrouvent sous les numéros 431 et 432.

5.2. Défaut de rechargement *(défaut Nos 471-472)*

Le défaut 471 est un défaut de fatigue transversal dont l'aspect est celui d'une tache ovale (fig. 171) et qui entraîne la rupture du rail. Il prend naissance sur des porosités, des inclusions ou des microfissures sous-jacentes au rechargement et dues à une insuffisance de précaution au cours de l'exécution. Le défaut 472 est un simple écaillage de la partie rechargée.

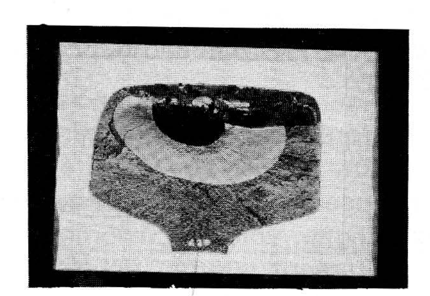


Fig. 171. — *Fissuration sous rechargement*

5.3. Défaut sous connexion électrique *(défaut N° 481)*

Il s'agit d'une fissuration transversale ou oblique qui s'amorce sur le flanc du champignon, sur l'âme ou l'aile du patin au droit d'une connexion de retour de courant de traction.

6. Évolution des défauts

Les figures 151 présentent l'évolution des ruptures et défauts sur la SNCF sur une trentaine d'années. Ces statistiques d'aspect global traduisent bien l'évolution technique marquée à la fois par l'augmentation du trafic et des vitesses, l'amélioration de la qualité de l'acier à rails, le développement des rails durs et celui des soudures, corrélatif à la suppression des joints. Ce genre de statistiques est fondamental pour les orientations à prendre en matière d'acier à rails.

7. Établissement et utilisation des statistiques

Sur la SNCF, depuis 1950, chaque rail retiré du service pour rupture ou défaut fait l'objet d'une ''fiche de retrait'' émise par les services locaux qui précise l'identité métallurgique du défaut (numéro de code UIC), sa situation géographique, ainsi que les caractéristiques d'environnement (tracé de la voie, trafic, vitesse).

Les données recueillies traitées sur ordinateur sont mises en mémoire. Ces retraits individuels intéressent une population annuelle de 15 à 20 000 individus.

L'analyse des seuls retraits de rails n'aurait qu'une faible signification si elle ne pouvait s'appuyer sur un dénominateur connu. C'est pourquoi a été mis en place un ''fichier'' de pose des rails neufs opérationnel depuis 1960.

Chaque rail neuf posé lors des renouvellements de voie fait l'objet d'une ''fiche de pose'' qui précise son identité métallurgique (usine, date de fabrication, nuance d'acier, référence de coulée) et son emplacement géographique (ligne, voie, file, kilomètre). Ce document de base suit le même traitement que la ''fiche de retrait''. A l'heure actuelle, ces fiches représentent annuellement environ 50 000 rails de 36 mètres.

L'exploitation de ces fichiers permet d'obtenir :

— des statistiques périodiques des retraits de rails par type de défauts, par ligne et par population métallurgique ;
— la diffusion de documents issus de la comparaison des fichiers de pose et de retraits indiquant notamment par sections de lignes

d'armements homogènes le taux cumulé des retraits de rails depuis la pose.

Ces différents éléments d'information permettent de procéder à des analyses des problèmes posés par les rails sur des zones de voie déterminées. On peut par exemple déceler des signes de vieillissement par fatigue ou les anomalies d'usure en courbe, patinages, etc. Ces analyses peuvent d'ailleurs être complétées par des études prospectives plus affinées en appliquant la loi de Weibull à partir des éléments connus.

Enfin, l'analyse statistique permet de vérifier le bien-fondé des méthodes appliquées à la prévention des incidents (contrôles ultrasonores, mesures réglementaires de surveillance) ou à la réparation de certains défauts et d'apporter éventuellement à ces méthodes ou prescriptions les correctifs nécessaires.

7.2. Un aspect de l'utilisation de la statistique est fourni par les graphiques des figures 172 et 173 qui montre l'évolution des défauts de rails sur la SNCF pendant une vingtaine d'années. Ces graphiques mettent bien en évidence un certain nombre de phénomènes :

— amélioration de la qualité de l'acier à rails
— diminution des défauts d'abouts
— diminution des taches ovales
— incidence croissante du shelling
— intérêt de la réparation des empreintes de patinage.

L'étude de ces courbes souvent affinée pour des analyses plus précises est un outil très puissant pour le progrès technologique.

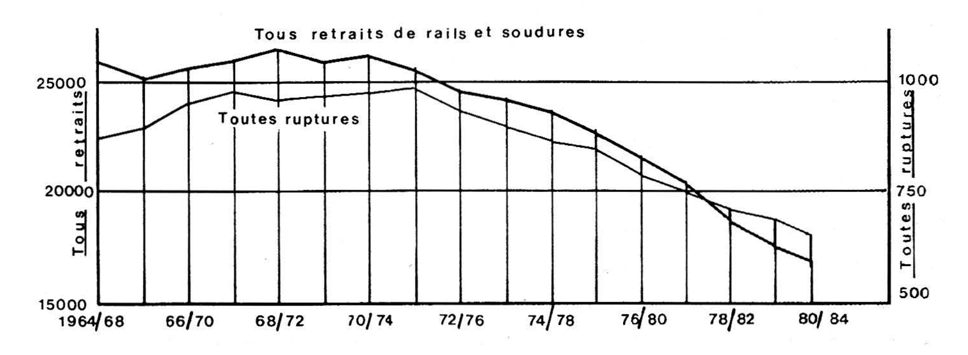
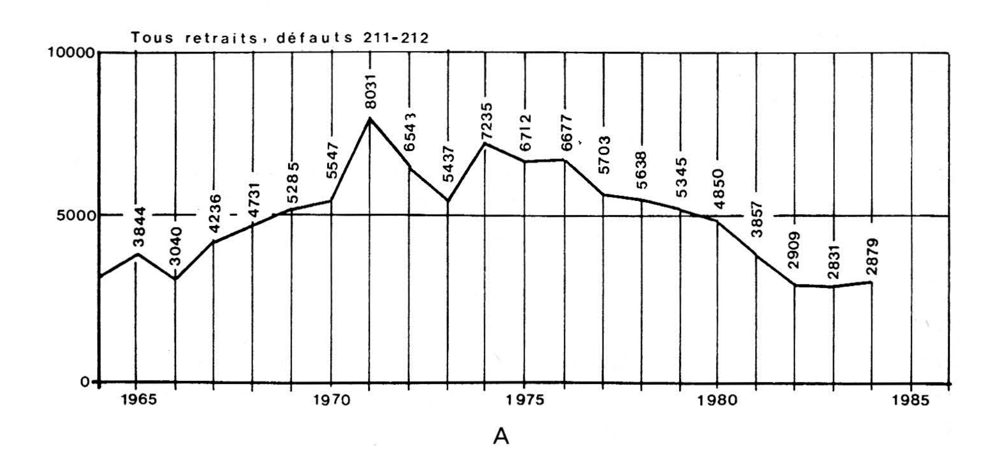
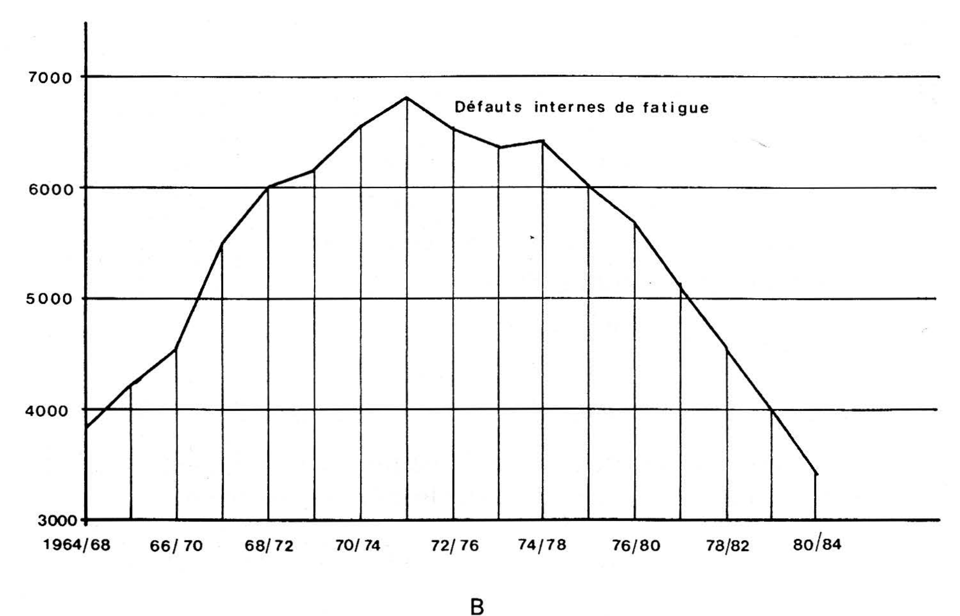


Fig. 172. — *Lissage sur 5 ans des principaux défauts*

Fig. 173 A/B/C/D. — *Lissage sur 5 ans des principaux défauts*



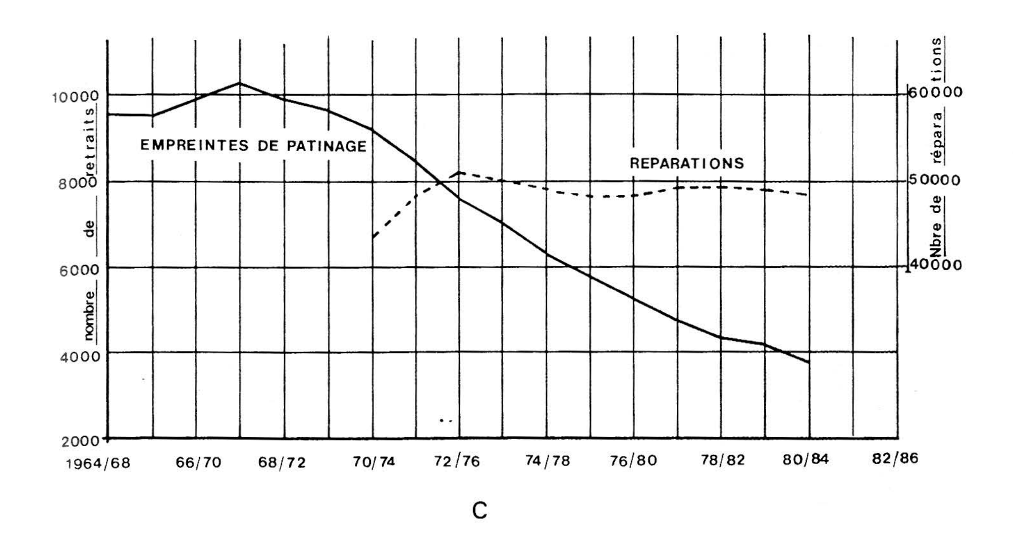
A



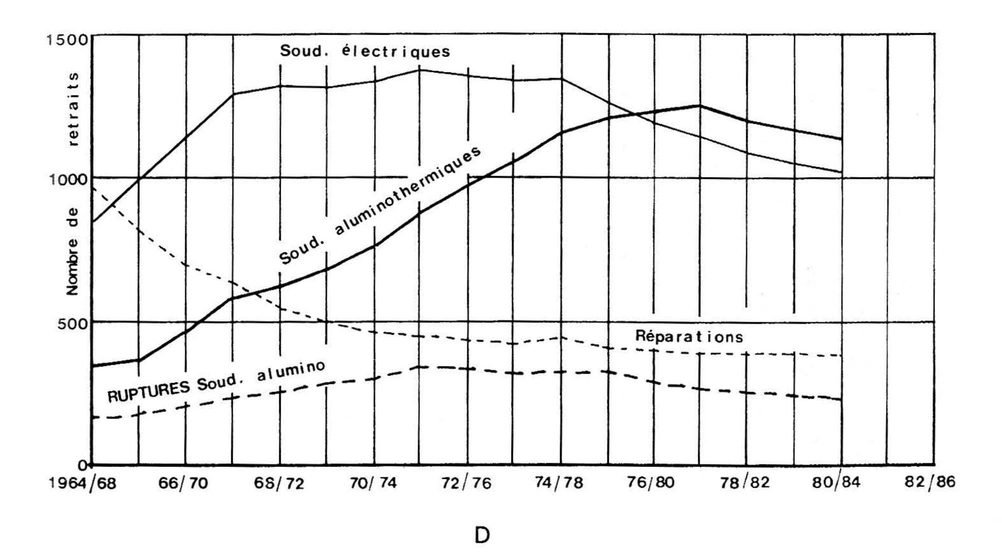
B

7.3. Modèle probabiliste de durée de vie

7.3.1. Les nombreuses statistiques de défauts de rails analysées sur différents réseaux montrent qu'il est possible de représenter leur



C



D

évolution par un modèle, représentation mathématique d'une réalité complexe se prêtant à l'analyse mathématique.

Un modèle probabiliste de durée de vie est entièrement caractérisé par l'une quelconque des fonctions suivantes :

a. *Fonction de répartition*

C'est la probabilité qu'a la variable aléatoire X d'être inférieure ou égale à la valeur fixée x :

$$F(x) = P\ (X \leqslant x)$$

b. *Densité de probabilité de la variable x*

C'est la dérivée de la fonction de répartition

$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx}$$

La probabilité de trouver la variable X comprise entre x et x+dx est

$$P\ [x < X \leqslant x + dx] = f(x)dx$$

c. *Taux instantané de défaillance*

C'est la probabilité d'avarie d'un élément de l'ensemble considéré à la date x sachant que la défaillancce n'est pas survenue avant cette date

$$h(x) = \frac{f(x)}{1 - F(x)}$$

d. *Fonction cumulative du taux de défaillance*

$$H(x) = \int_o^x h(x)dx$$

7.3.2. La loi de Weibull constitue un excellent modèle de représentation des avaries du rail. Ses fonctions caractéristiques sont les suivantes :

Fonction de répartition

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}}$$

Densité de probabilité

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta^{\beta}}\, t^{(\beta-1)} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}}$$

Taux de défaillance

$$h(t) = \frac{\beta}{\eta^{\beta}}\, t^{(\beta-1)}$$

Fonction cumulative du taux de défaillance

$$H(t) = \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}$$

β est le paramètre de forme
η est le paramètre d'échelle de la loi

On constate que :

si $\beta > 1$, h(t) croît : le matériel s'use en service

si $\beta < 1$, h(t) décroît : le matériel s'adapte après une période de "déverminage".

Si $\beta = 1$, h(t) = constante : cas particulier de la loi exponentielle.

La figure 174 montre quelques aspects des courbes selon différentes valeurs de β et pour $\eta = 1$, les avaries de rails étant bien représentées avec un paramètre de forme sensiblement égal à 3.

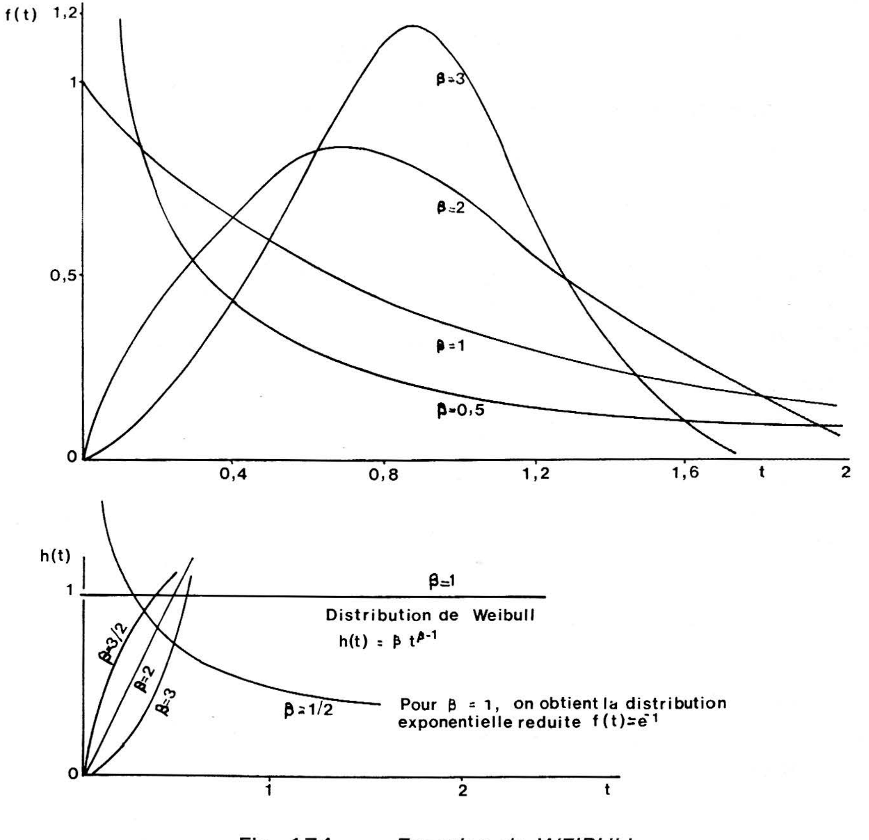


Fig. 174. — *Fonction de WEIBULL*

7.3.3. Afin de donner une représentation claire de la loi de Weibull on utilise des graphiques fonctionnels en portant Log(x) en abscisse et Log Log[l − F(x)] = − β Log $\frac{x}{\eta}$ en ordonnée.

La fonction de répartition est alors représentée par une droite. Pour faciliter l'ajustement graphique dans le cas fréquent de données incomplètes (essai tronqué des éléments ayant été retirés de l'ensemble ayant défailli), on utilise ainsi des graphiques permettant de transformer en droite la fonction H(x) qui est dans ce cas une estimation de la fonction cumulative du taux instantané de défaillance.

Pour obtenir β, on mène par le point d'abscisse 1 et d'ordonnée 63 % la parallèle à la droite de Weibull. On lit à son intersection avec la verticale élevée au point d'abscisse 0.37 la valeur de β sur une graduation linéaire à l'échelle $1 - \frac{1}{e} = 0.632$.

Le tracé des droites de Weibull (fig. 175) permet à partir d'un petit nombre de points une extrapolation facile d'où résulte à la fois un jugement sur la qualité intrinsèque d'une fabrication déterminée et une prévision sur les défaillances successives et la durée de vie globale. Si, par exemple, on se fixe un pourcentage a priori de retraits globaux de rails devant entraîner un renouvellement (renouvellement complet ou renouvellement de rails seuls) on peut procéder à une programmation plusieurs années à l'avance. La figure 176 fait bien apparaître l'incidence du poids du rail sur l'évolution des défauts et surtout le problème de fabrication, l'introduction du Ralus permettant à 500.16^6 tonnes de trafic de diviser par 10 et 20 le nombre de retraits de rails UIC 60 et U50 kg. Elle permet la comparaison entre des réseaux de caractère différent (charge par essieu, par exemple) qui montre bien la tendance recherchée vers une durée de vie de l'ordre du milliard de tonnes. Elle met aussi en évidence la valeur de l'ordre de 3 à 3.5 du paramètre β de la loi de Weibull quelle que soit l'origine du rail.

7.4. Des études faites dans le cadre du Comité D88 de l'ORE ont permis d'établir une loi empirique de caractère statistique de développement des fissurations transversales de fatigue. Si S_o est le rapport de la surface du défaut au moment de sa découverte, à la sur-

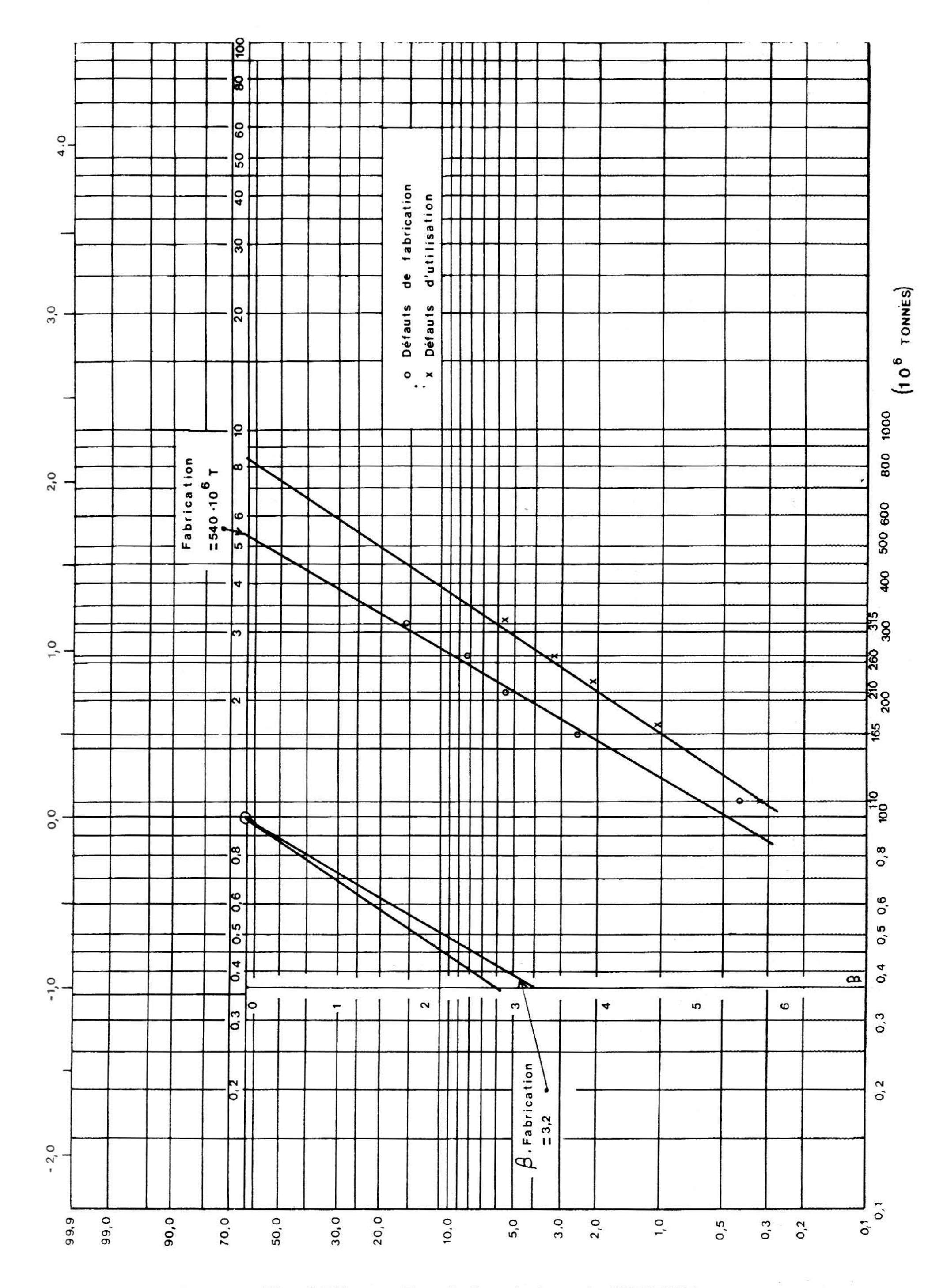


Fig. 175. — *Tracé des droites de WEIBULL*

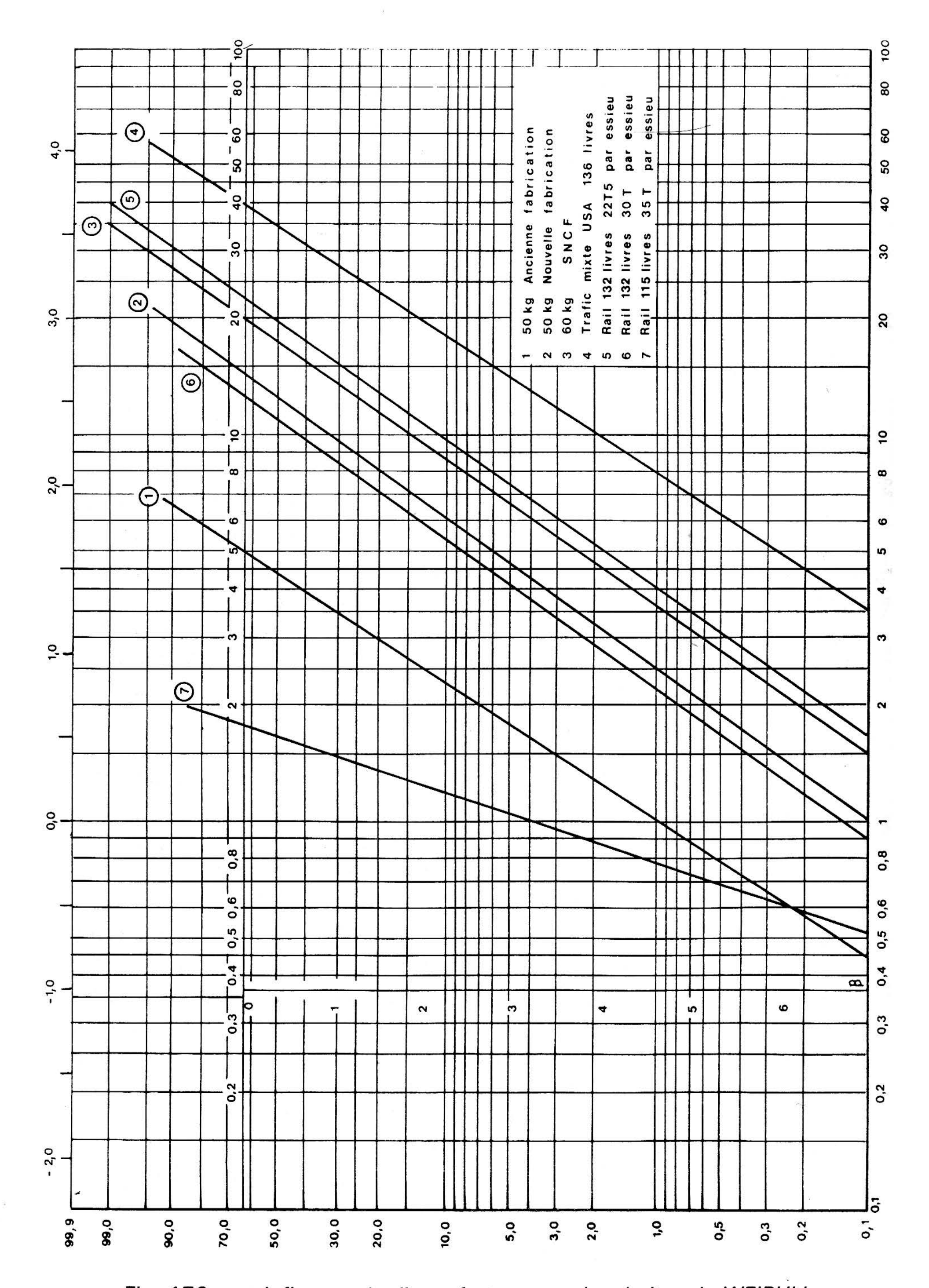


Fig. 176. — *Influence de divers facteurs sur les droites de WEIBULL*

face totale du champignon, le même rapport S, à l'instant t, après passage de T million de tonnes de trafic est donné par :

$$S = S_o \; e^{0\cdot 12\, T}$$

Il s'agit d'une courbe moyenne (4) dont l'écart-type est de 0,19S. Par exemple pour 3 écarts-type la valeur de S avec un niveau de 99,8 % est comprise entre 0,43 $S_o \; e^{0,12\, T}$ et 1,57 $S_o \; e^{0,12\, T}$

Cette règle qui aura besoin d'être confirmée par le calcul paraît indépendante de la charge par essieu, au moins dans une large fourchette.

On a également montré statistiquement que la rupture se produisait pour un rapport S égal à 0.70 si les voies ne sont pas auscultées et 0.57 en cas d'auscultation du fait du retrait systématique de défauts qui sinon auraient continué d'évoluer. L'écart-type est de 0.18.

Ces lois permettent, après découverte d'une fissuration transversale donnée, de calculer, en fonction du tonnage journalier supporté par la ligne considérée, une date probable de rupture. Supposons par exemple la découverte d'une tache ovale telle que $S_o = 0.15$ sur une ligne de 35 000 T/jour. Prenons un intervalle de confiance de 95 %, c'est-à-dire la probabilité de rupture à 95 % du défaut après la date J.

95 % est le produit de deux probabilités inverses de 77.7 % soit 1,282 σ. On a donc

$$0.57 \times 0.77 = 0,15\,(1 + 0,19 \times 1,282)\, e^{0,12\, T} = 0,186\, e^{0,12\, T}$$

d'où

$$T \;\#\; 7^{M} \text{ tonnes, soit } \frac{7\text{ MT}}{0,035} = 200 \text{ jours}$$

Pour une probabilité de 99 % (1,645 σ) T = 6^{MT} soit 170 jours. Pour 60 000 T/jour, on trouve respectivement 115 et 100 jours. Pour 99,8 % on trouve 128 et 75 jours, ce qui montre que les découvertes d'avaries au cours des auscultations laissent normalement un délai suffisant pour le retrait du rail incriminé. Ces données ont permis à la SNCF de procéder à une analyse plus poussée des conditions d'auscultation de la voie, basée sur la loi statistique de développement des défauts, le risque de rupture, l'alea de périodicité d'auscultation du fait de difficultés d'exploitation et la fiabilité d'auscultation (avant exploitation de l'engin V4).

---

(4) Le coefficient 0.12 peut légèrement varier suivant le profil du rail.

Le modèle obtenu a d'abord permis d'analyser l'influence de la périodicité d'auscultation sur le nombre de ruptures. La figure 177 montre le peu d'intérêt d'une périodicité inférieure à 12 MT, ce qui poserait d'ailleurs sur ligne à fort débit un problème de circulation.

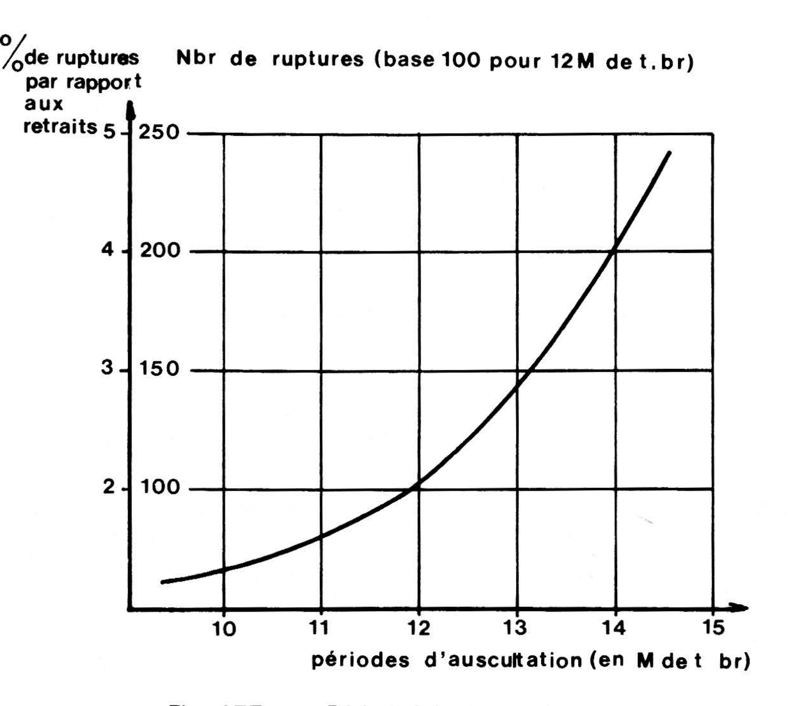


Fig. 177. — *Périodicité des sondages*

On a pu également procéder à une étude de coût prenant en compte le coût des ruptures (avec utilisation d'un coefficient de majoration en fonction de la densité de circulation), le coût de suppression des avaries et le coût des contrôles. Le résultat est représenté par la figure 178 qui présente un optimum économique dans une fourchette de périodicité de 10 à 12 MT. Ce coût ne tient bien entendu pas compte des conséquences de déraillement qui ne feraient qu'inciter à multiplier les contrôles.

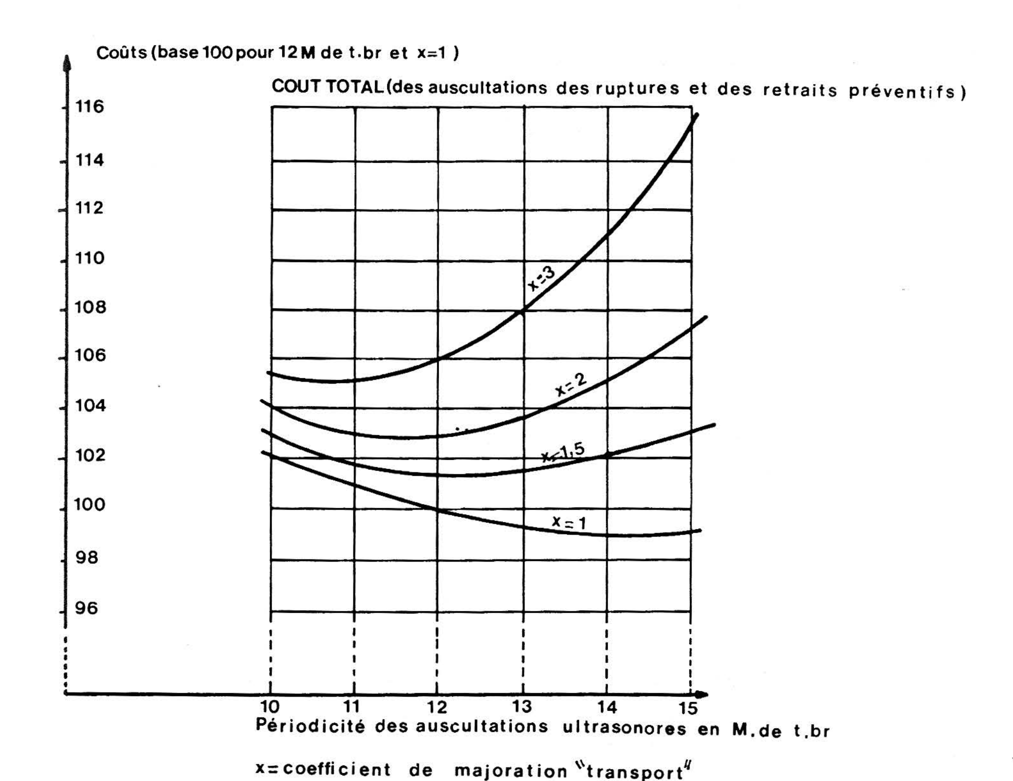


Fig. 178. — *Côut des sondages*

ANNEXE 3

Protection contre la corrosion

Nous ferons l'hypothèse que le réseau a le choix entre trois solutions :

1. aucune protection : renouvellement de rails à faire tous les 4 ans
2. protection par peinture : surcoût de 20 %. Renouvellement tous les 8 ans
3. protection par métallisation : surcoût de 50 %. Renouvellement tous les 12 ans.

Si i est le taux d'actualisation et C le coût d'un kilomètre de renouvellement de rails, les coûts actualisés des diverses solutions sont :

Sol. 1

$$C\left[1 + \Sigma \frac{1}{(1+i)^n}\right] \quad \text{pour } n = 4, 8, 12, 16, 20, 24$$

Sol. 2

$$1{,}2\ C\left[1 + \Sigma \frac{1}{(1+i)^n}\right] \quad \text{pour } n = 8, 16, 24$$

Sol. 3

$$1{,}5\ C\left[1 + \Sigma \frac{1}{(1+i)^n}\right] \quad \text{pour } n = 12, 24$$

Les coefficients numériques de C sont alors

Taux	1	2	3
6 %	3.91	2.76	2.67

9 %	3.13	2.25	2.26
12 %	2.63	1.96	1.99
15 %	2.29	1.75	1.83

Le résultat est donc assez sensible à i, ce qui paraît assez évident. La solution la plus économique est à peu près systématiquement la deuxième. Mais des variations dans les durées amènent des modifications susceptibles d'influencer sur le résultat final. Chaque cas doit donc faire l'objet d'une étude.

RÉSUMÉ DU CHAPITRE 7

Les statistiques d'avaries et ruptures de rails rapportées aux populations concernées sont basées sur le traitement informatique de données recueillies sur le tas (fichier de pose et fichier d'avaries). Ces statistiques ne peuvent faire l'objet de comparaisons entre réseaux que moyennant un grand luxe de précautions compte tenu des différences de caractéristiques et de la diversité des politiques suivies en matière de remplacement de rails.

Sur la SNCF, comparable à bien d'autres réseaux, les avaries les plus fréquentes sont les fissurations transversales du champignon (taches ovales), les empreintes de patinage, le shelling et les défauts de soudures. L'ensemble des défauts fait l'objet d'un catalogue édité par l'UIC qui permet une reconnaissance en général aisée des avaries. Les fissurations horizontales et transversales internes qui dégénèrent le plus souvent en ruptures sont dues à des inclusions ou chapelets d'inclusions dans la zone de cisaillement maximal du champignon. Les flocons d'hydrogène jouent également un rôle générateur important. Les défauts de surface bien visibles sont en général peu dangereux. La fente au patin a complètement disparu dans les fabrications modernes. Il en est de même des étoilures autour des trous d'éclissage dans la mesure où ils sont de faible diamètre et où ils ont été alésés. Parmi les défauts dus à l'utilisation, il faut plus particulièrement mentionner les empreintes de patinage, aisément réparables en voie, l'usure latérale en courbe et la corrosion. Le shelling qui se développe de plus en plus dans les courbes à faible usure du fait de la pose de rails durs ou de l'emploi de graissage peut dans certains cas

dégénérer en ruptures. Enfin, l'usure ondulatoire fait l'objet du chapitre IX.

Le défaut le plus dangereux, la ''tache ovale'', indétectable à l'œil et dégénérant toujours en rupture a pu être modélisé par une loi de Weibull qui permet de déterminer statistiquement l'évolution probable de toute fissuration détectée par un procédé non destructif et ainsi de prendre en temps utile les mesures de sécurité nécessaires et également de fixer a priori en fonction du trafic la périodicité de passage en voie des véhicules d'auscultation.

8 CONTRÔLE DES RAILS EN VOIE

1. Nécessité de contrôle

1.1. Dans le chapitre précédent, nous avons décrit les divers types de défauts de rails que l'on peut rencontrer en voie, en insistant sur leur morphologie, leur vitesse de développement et leur caractère de gravité. Il est nécessaire dans le cadre de la maintenance de détecter en temps utile l'existence de défauts mettant en jeu la sécurité, c'est-à-dire susceptibles d'évoluer en rupture à plus ou moins brève échéance. A cet effet, la reconnaissance des défauts doit intervenir suffisamment à temps pour permettre le remplacement de tout ou partie du rail incriminé dans le délai séparant la découverte de la rupture : or, sauf circonstances exceptionnelles, le délai d'intervention est tributaire de l'approvisionnement en rails de remplacement et surtout d'intervalles de travail entre les trains, intervalles de plus en plus difficiles à obtenir des services d'exploitation avec l'augmentation des vitesses et le développement du trafic.

1.2. Pour détecter les défauts, la méthode de base qui remonte à l'origine des chemins de fer est l'examen visuel, sur les conditions d'emploi duquel nous reviendrons dans le chapitre consacré à la maintenance. Bien que toujours d'actualité, cette méthode présente cependant de multiples inconvénients qui en limitent la portée :

— certains défauts, la tache ovale en particulier, sont indétectables à l'œil, tout au moins au stade initial de leur développement

— d'autres sont d'autant plus difficiles à apercevoir (fissurations aux congés de raccordement, défauts d'éclissage) qu'ils sont souvent peu visibles en eux-mêmes, même à l'aide d'un miroir adapté, et qu'ils sont faciles à confondre avec les multiples taches qui recouvrent un rail, ou même cachés par la graisse ou la saleté.

Finalement, les défauts visibles sont très souvent les moins dangereux.

Même en cas de visibilité, on ne repère qu'un aspect du défaut, la partie cachée étant de beaucoup la plus significative, d'où de fréquentes erreurs de diagnostic.

L'examen visuel est long, fastidieux, dangereux et coûteux. Il nécessite en effet un œil exercé, d'un agent de la voie travaillant dans des conditions difficiles sous la protection d'autres agents : sur les lignes à grande vitesse, tout contrôle est même interdit sans interruption de circulation. Le démontage d'éclisses nécessite également des précautions particulières. Le coût total est donc très élevé (de l'ordre de 1 000 FF au kilomètre) pour un résultat à la fois incomplet et aléatoire.

1.3. C'est pourquoi depuis plus de cinquante ans, les réseaux ferrés ont cherché à mettre en service des moyens de détection plus rapides, moins coûteux, plus fiables et pour lesquels les progrès de l'électronique moderne ont permis de faire appel à une automatisation de plus en plus poussée. C'est le but du contrôle non destructif en voie qui s'inspire de techniques mises en jeu dans beaucoup d'autres domaines d'application de la métallurgie et de la soudure.

Ces procédés de contrôle non destructif font appel à l'induction, à l'électromagnétisme, aux ultrasons et aux courants de Foucault, ces deux dernières méthodes ayant pris le pas sur les deux premières, car elles sont plus rapides, plus fiables et mieux à même de faciliter l'automatisation des contrôles.

1.4. C'est aux USA que ce contrôle apparut tout d'abord pour garantir la sécurité de réseaux dont les rails présentaient de nombreuses fissurations transversales internes du champignon. En dépit d'un pre-

mier brevet de 1877 basé sur l'induction magnétique, ce n'est que vers 1930 que fut construite par Sperry la première voiture d'auscultation. Après la fin de la deuxième guerre mondiale, certaines administrations ferroviaires européennes, en particulier la SNCF et la DB, ressentirent impérieusement la nécessité d'un tel contrôle portant annuellement sur plusieurs milliers de kilomètres.

C'est également vers la même époque que s'est introduit en particulier sur la SNCF le contrôle non destructif, en atelier, de rails qui, déposés des voies principales les plus chargées, peuvent assurer une seconde vie sur des voies moins sollicitées.

2. Principes de contrôle non destructif

2.1. Auscultation électrique

Elle constitue en fait une mesure de résistance électrique entre deux contacts situés à distance fixe, encadrant l'anomalie à confirmer. Lorsque l'on fait passer un courant intense et de faible voltage entre ces contacts, la réduction de section de courant due à la présence d'un défaut entraîne une variation de tension approximativement proportionnelle à son importance. La mesure, essentiellement discontinue, ne peut s'appliquer qu'à un emplacement préalablement connu : elle ne peut donc être pratiquement utilisée que pour la confirmation des présomptions de défauts internes déjà repérés. Cette première méthode fut essayée par Sperry en 1927 en continu, mais elle était très influencée par la qualité des contacts ; en outre l'état de surface du rail conduit à de nombreuses fausses détections.

Ce procédé a été utilisé il y a une trentaine d'années pour assurer la confirmation manuelle des défauts détectés par les voitures (courant de 1 500 ampères sous 2 volts).

2.2. Induction

Les premières voitures de contrôle mises en service par la société Sperry (1929) étaient équipées d'un dispositif de détection par induc-

tion. Des sabots-balais, en contact avec la surface de roulement du rail, placés à l'avant et à l'arrière de la voiture, envoient dans celui-ci un courant électrique de 2 000 à 3 000 ampères à basse tension. Le champ magnétique qui s'établit autour du rail subit des distorsions au droit de solutions de continuité internes du métal. Des bobines chercheuses sont traversées par un courant qui une fois amplifié, déclenche des relais provoquant simultanément un enregistrement sur une bande de papier et une projection de peinture sur le rail au droit du défaut détecté. Cette magnétisation n'a aucun caractère rémanent.

Certaines voitures Sperry utilisent toujours ce procédé (vitesse 20 km/h) combiné avec l'emploi d'ultrasons. La confirmation sur place du défaut se fait par la méthode de l'auscultation électrique ci-dessus écrite.

2.3. Contrôle électro-magnétique

Il utilise la dispersion magnétique d'un champ préexistant qui se produit au droit d'un défaut. Si dans un champignon de rail préalablement aimanté existe une discontinuité interne recoupant le champ, ce dernier est perturbé. Le champ local se déforme avec apparition de lignes de fuite qui peuvent être détectées par un dispositif approprié. On utilise à cet effet des bobines chercheuses dans lesquelles les perturbations de flux induisent des tensions qui, après amplification, actionnent des relais.

Quelques années après la guerre, la société Teleweld de Chicago a construit des voitures de contrôle électromagnétique dont la SNCF acheta en 1953 et 1956 l'équipement pour l'installer sur deux voitures dites "Teledetector". Un ou deux groupes d'électro-aimants puissants magnétisent à saturation le champignon du rail ; la détection est effectuée, comme dans le cas des voitures Sperry, par des bobines étalonnées couplées avec le champ local. Les courants induits amplifiés excitent des relais enregistreurs et provoquent en même temps des projections de peinture au droit des défauts présumés.

Dans ce procédé, c'est donc le magnétisme rémanent qui est à la base de la détection et qui nécessite par conséquent pour supprimer tout magnétisme résiduel l'installation de bobines démagnétisantes sur la voiture d'auscultation.

Ce type d'auscultation n'est malheureusement sensible qu'aux transversaux qui recoupent le flux magnétique, mais par contre détectent beaucoup de défauts fantômes.

L'appareillage des voitures utilisées par la SNCF fonctionnait à l'aide de courants produits par 3 génératrices mues par un moteur à essence de 75 kW :

— électro-aimants : 115 V continu - 30 ampères
— démagnétiseurs : 200 V alternatif - 1 ampère - 800 périodes
— partie électronique : 115 V alternatif - 20 ampères - 60 périodes.

Deux électro-aimants induisaient dans le champignon un champ magnétique saturant l'acier du rail. Un démagnétiseur atténuait ensuite l'intensité des champs rémanents dans la couche immédiatement sous-jacente à la surface de roulement pour privilégier la détection des défauts internes par rapport à celle des défauts superficiels.

La détection proprement dite était alors réalisée par le passage, après le démagnétiseur, de bobines étalonnées dans lesquelles se produisaient, en cas de défaut interne, de faibles tensions induites dues à la présence de champs magnétiques rémanents locaux. Après amplification, ces variations de tension excitaient les relais actionnant les styles enregistreurs. Sept bobines détectrices étaient groupées dans un pick-up se déplaçant parallèlement à la surface de chaque rail. Le premier groupe de 2 bobines avait son axe à l'aplomb de la face latérale intérieure du champignon, le deuxième à 18 mm et le troisième, ainsi que la septième bobine, à 54 mm de cette face. Cette septième bobine, à sensibilité réduite, était destinée à repérer les joints des rails.

Toutes ces méthodes à grosses consommations de courant ne permettent pas, contrairement aux ultrasons de fixer avec précision la dimension et la position du défaut ; elles donnent de fausses indications sur les défauts de surface (empreintes de patinage, usure ondulatoire) ; enfin, elles sont totalement inefficaces dans les joints. Elles ne se prêtent donc pratiquement pas à l'informatisation de la détection.

3. Les ultrasons

3.1. Généralités. Découvert en 1880 par les frères Curie, l'effet piézo-électrique dut attendre 1927 (Sokolov) pour être utilisé à la

détection des défauts dans les métaux et 1964 pour la détection des défauts internes de rails sur la SNCF. Certains cristaux ont la propriété de changer de forme sous l'action d'un potentiel électrique et vice-versa. Sous l'action d'un courant alternatif de fréquence convenable, on peut faire vibrer le cristal à la même fréquence et émettre un faisceau plus ou moins concentré d'ultrasons qui se réfracte et se réfléchit dans des conditions analogues à celles des rayons lumineux. Si inversement, le faisceau, après réflexion, vient frapper le même cristal ou un cristal analogue, celui-ci va émettre un courant de fréquence égale à celle de la vibration incidente. Le seuil au-dessus duquel on situe les ultrasons est de l'ordre de 20 à 25 kHz. Leur longueur d'onde est liée à la fréquence f par la relation classique : $\lambda = \frac{V}{f}$ v étant la vitesse de propagation des ondes correspondantes dans le milieu considéré. Lorsqu'une onde ultrasonore rencontre une surface de séparation entre deux milieux d'impédances acoustiques différentes (p. ex. eau-acier, air-rail, fissuration ouverte) il y a à la fois réflexion et réfraction de l'onde suivant des angles fonction de sa vitesse de propagation dans les milieux intéressés, d'après une formule analogue à la loi correspondante de l'optique géométrique (fig. 179).

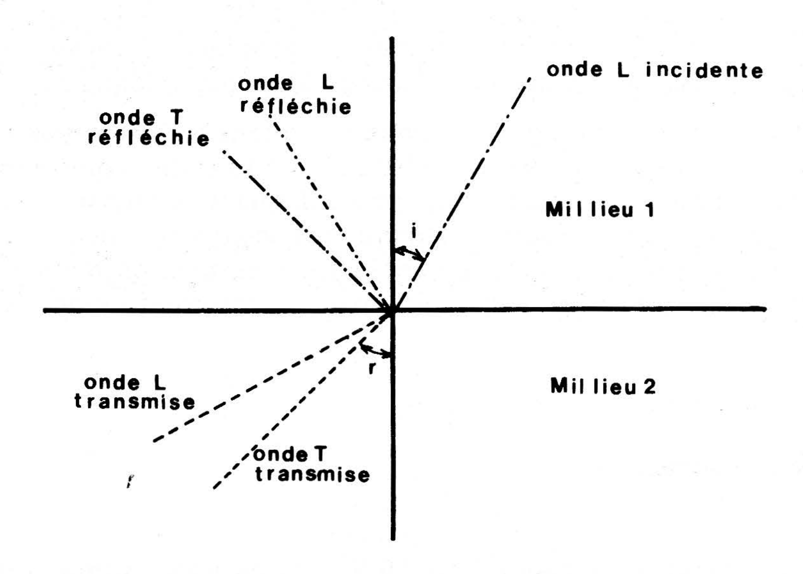


Fig. 179. — *Réflexion et réfraction des ondes US*

3.2. Aspect théorique. L'impédance acoustique est le produit pv de la masse spécifique du milieu par la vitesse de propagation de l'onde dans ce milieu.

Le rapport entre l'amplitude Ar de l'onde réfléchie par une surface de séparation et l'amplitude Ai de l'onde incidente est donnée par

$$Ar = \frac{p1v1 - p2v2}{p1v1 + p2v2} Ai$$

L'énergie de l'onde dans un milieu donné est proportionnelle au carré de l'amplitude. Par suite

$$Rr = \left(\frac{p1v1 - p2v2}{p1v2 + p2v2}\right)^2 Ri$$

Rr = énergie réfléchie
Ri = énergie incidente.

De ces formules, on déduit très facilement qu'entre l'air et un solide, l'énergie est pratiquement réfléchie entièrement. Dans le cas de liquide-acier 88 % de l'énergie est réfléchie. On ne reçoit donc plus après deux transmissions à travers la surface de réflexion que $0{,}12^2$, soit 1,4 % de l'énergie émise. En fait, lorsqu'un faisceau ultrasonore frappe un obstacle, il est réfléchi de différentes manières selon les caractéristiques de la surface de réflexion. Si cette surface est petite devant la longueur d'onde, le faisceau ultrasonore est diffusé dans toutes les directions et la fraction de l'énergie qui revient sur l'émetteur est alors négligeable. Dans le cas où il existe un grand nombre de ces petits obstacles, le faisceau d'ultrasons subit une absorption importante. On peut donc dire que plus la section de réflexion du défaut est grande, plus importante est l'énergie réfléchie donc plus grande l'amplitude du signal reçu.

Pour certains défauts, il faut envoyer dans le rail à contrôler un faisceau ultrasonore sous une certaine incidence. A cet effet, on utilise des prismes solides (plexiglas) ou liquides.

Soit i l'angle du rayon incident dans le 1er milieu.
Soit r l'angle de réfraction dans le 2e milieu.

L'angle de réfraction est donné par la relation :

$$\frac{\text{Sin i}}{\text{Sin r}} = \frac{Vi}{Vr}$$

rapport des vitesses de propagation dans les 2 milieux.

Ce phénomène est en réalité plus complexe car, à chaque surface de séparation, une onde arrivant sous incidence inclinée se transforme en plusieurs types d'ondes suivant la loi de Snell :

$$\frac{\text{Sin } \alpha_i}{V_i} = \frac{\text{Sin } \alpha_2}{V_2}$$

α_2 et V_2 étant l'angle de réfraction et la vitesse de chaque type d'onde longitudinal ou transversal dans le second milieu. D'après la figure 179 on voit qu'une onde L arrivant à la surface de séparation de deux matériaux donne naissance à 4 ondes résultantes, 2 longitudinales et 2 transversales, dont 2 sont réfléchies et 2 sont transmises.

Le tableau N° 27 donne quelques valeurs significatives

TABLEAU 27

Angle d'incidence dans le plexiglas	Angle de l'onde transversale réfractée dans l'acier
29°	35°
36° 40'	45°
49° 55'	65°

Le tableau N° 28 donne la vitesse des ultrasons dans un certain nombre de milieux.

TABLEAU 28

Vitesse	ondes	
milieu	Longitudinales	transversales
air	331 m/s	n'existe pas
eau	1483 m/s	n'existe pas
acier	5850 m/s	3230
plexiglas	2700 m/s	

On en déduit les longueurs d'ondes dans l'acier (tableau 29).

TABLEAU 29

	2 MHz	3 MHz	4 MHz	
onde longitudinale	2,92	1,95	1,46	en mm
onde transversale	1,62	1,08	0,81	

Entre gaz et solide, la transmission est presque nulle. Il en découle à la fois la possibilité de détection des fissures dans l'acier et la nécessité d'un liquide de couplage (eau, huile) entre la sonde et le rail.

3.3. Détection des défauts

3.3.1. On peut utiliser les ondes ultrasonores soit par réflexion, soit par transmission. Dans le premier cas (fig. 180) le temps mis par

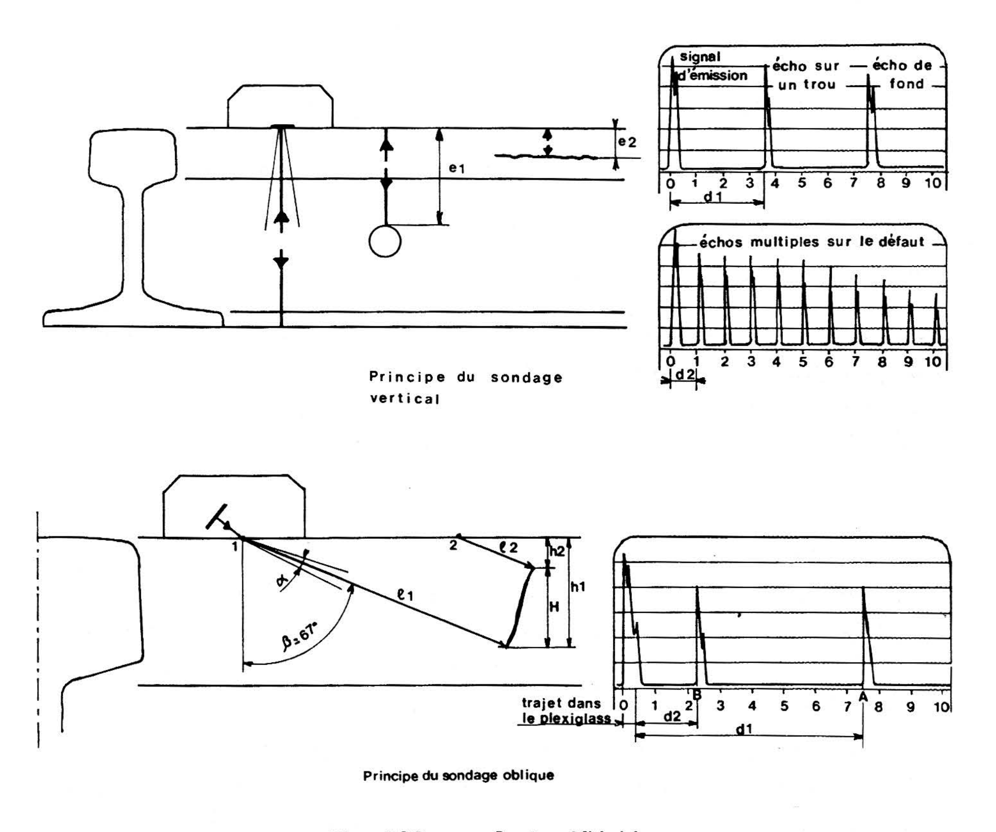


Fig. 180. — *Onde réfléchie*

l'impulsion, réfléchie par exemple par le patin du rail pour un trajet aller et retour, est mesurée par la distance séparant sur un écran cathodique les spots d'émission et de réception de l'impulsion. Si le fais-

ceau rencontre un défaut perpendiculaire, le spot de réception se rapproche ou s'éloigne du spot d'émission (fonction linéaire de la profondeur du défaut). Si le défaut n'est pas perpendiculaire au faisceau, celui-ci est réfléchi, emprunte une autre direction et l'écho disparaît de l'écran. Inversement lorsqu'on travaille par transmission, il n'y a d'écho que dans la mesure où le faisceau n'est pas réfléchi par un défaut qui lui est perpendiculaire ou non. L'onde est fortement amortie au franchissement des surfaces de séparation (p. ex. 88 % de l'onde est réfléchie à l'interface eau-acier) et d'autre part elle subit un amortissement de forme exponentielle : la traversée de chaque milieu donne également lieu à une absorption de forme exponentielle. Enfin la dispersion du faisceau ultrasonore non focalisé diminue l'appréciation dimensionnelle.

3.3.2. Le faisceau ultrasonore émis peut être focalisé en utilisant une céramique émettrice adaptée en forme de lentille plan concave : on obtient alors une grande précision, mais limitée aux seuls défauts qui se trouvent dans la zone de focalisation (10 à 20 μ). Cette technique permet par exemple l'exploration d'une zone très petite en laboratoire (comptage d'inclusions) ou un contrôle par zone au défilé à la sortie de la chaîne de laminage. Dans le cas du rail, on n'utilise que des faisceaux théoriquement cylindriques, mais en réalité divergents donc en forme de troncs de cône dont le demi-angle au sommet α est relié au diamètre D de l'émetteur et à la longueur d'onde par la relation :

$$\text{Sin}\ \alpha = 1{,}22\ \frac{\alpha}{D}$$

Les céramiques de 20 mm à 4 MHz ($\lambda = 0{,}8$ mm en ondes transversales, 1,46 mm en longitudinal) donnent des valeurs de l'angle de divergence respectivement égales à 3° 50′ et 5°. La divergence du faisceau se fait bien entendu au détriment de la précision de mesure et de l'énergie transmise.

D'autre part, on admet généralement qu'une détection satisfaisante nécessite une longueur d'onde ne dépassant pas le tiers de la dimension du défaut : les longueurs d'onde précitées sont donc compatibles avec des défauts dont les dimensions sont de l'ordre de 2 à 3 mm. Toute diminution de λ permettra donc à la fois de diminuer la dispersion (α) et la dimension minimale détectable. D'autre part, l'affaiblissement énergétique dans le milieu traversé est fonction exponentielle de l'épaisseur et l'on peut tabler sur un affaiblissement de 1 décibel

par dix millimètres d'acier traversé. Le coefficient d'affaiblissement croît également en raison inverse de la longueur d'onde : si donc l'on ajoute la perte considérable par réflexion sur le plan séparateur de deux milieux (eau-acier, acier-air) on constate qu'une puissance instantanée d'émission de l'ordre du kilowatt (sous 150 volts) se traduit après réflexion sur le patin du rail par une réception de l'ordre de quelques millivolts. On ne peut donc sous peine de puissances prohibitives émettre des fréquences supérieures à 5 MHz et par conséquent la précision du défaut ne peut guère descendre au-dessous de 2 mm.

3.3.3. Enfin la vitesse d'un véhicule d'auscultation doit être prise en compte pour la détection des défauts. A 36 km/h, par exemple, le temps de réfléxion (parcours dans l'acier et dans l'eau, tolérance de la céramique) représente de 100 à 150 μs suivant la nature de l'onde. L'incidence des réflexions multiples ne permet guère de descentre au-dessous d'un temps de récurrence (1) de 400 μs (250 Hz), temps pendant lequel le véhicule aura parcouru 4 mm.

On conçoit qu'une vitesse supérieure à 50 km/h diminue fortement la précision étant donné cette limite de fréquence de récurrence, même dans la mesure où les problèmes de contacts de sondes seraient résolus à des vitesses de cet ordre. Le choix du type d'onde (longitudinal ou transversal) est défini par les orientations privilégiées des défauts et l'importance de l'énergie qu'ils réfléchissent (fig. 181). C'est pourquoi les sondes 0° et 30° travaillent en longitudinal, les sondes 35° et 70° en transversal.

3.3.4. La figure 182 présente l'aspect schématique sur écran cathodique des principaux types de défauts que l'on rencontre dans les rails au cours de l'auscultation. On constate l'allure caractéristique de chacun d'eux.

Il est possible que, dans l'avenir, une analyse spectrale de l'écho obtenu sur un défaut agissant comme fonction de transfert du faisceau incident en permette une meilleure connaissance, en particulier dans le cas des défauts de soudure.

---

(1) Le temps de récurrence est celui qui s'écoule entre deux émissions ultrasonores successives.

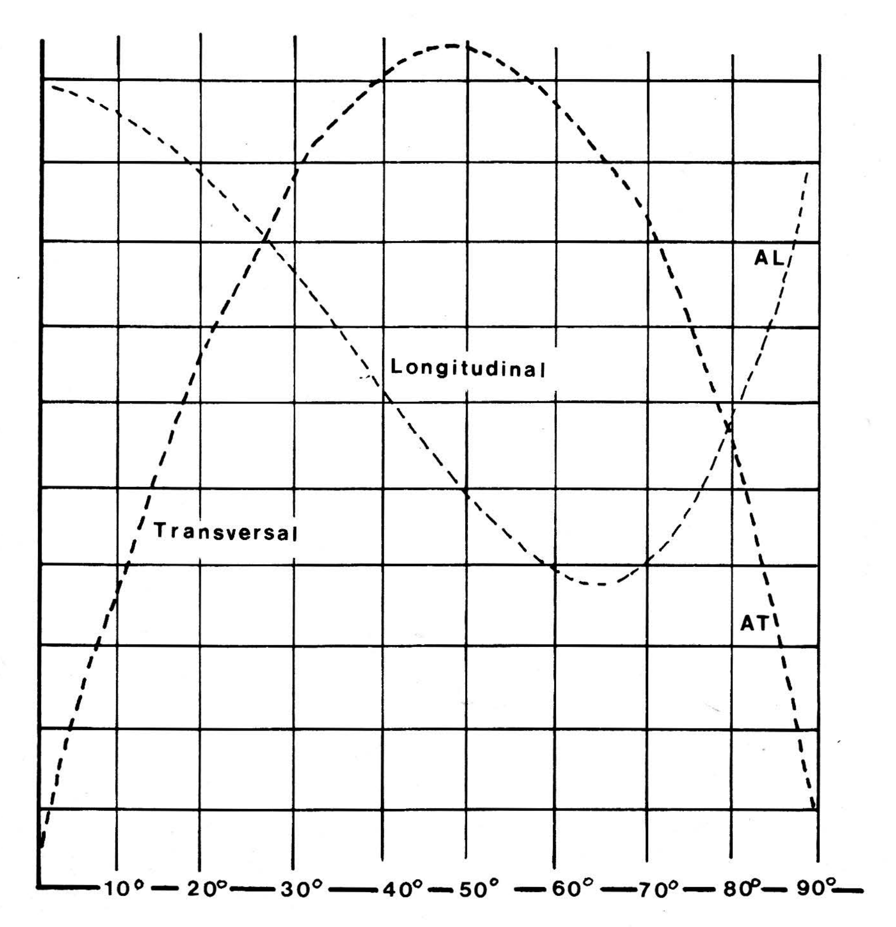


Fig. 181. — *Absorption d'énergie*

4. Les courants de Foucault

Une bobine conductrice parcourue par un courant alternatif et placée à proximité de la surface de roulement du rail crée par induction des courants dits de Foucault qui dans les matériaux ferromagnétiques se cantonnent à la surface du métal. Ces courants induisent à leur tour un flux dans la bobine émettrice dont l'impédance est modifiée. On conçoit que la présence de défauts superficiels perturbe la circulation des courants de Foucault et influe par conséquent sur l'impédance de la bobine qui sera modifiée par toute anomalie de surface.

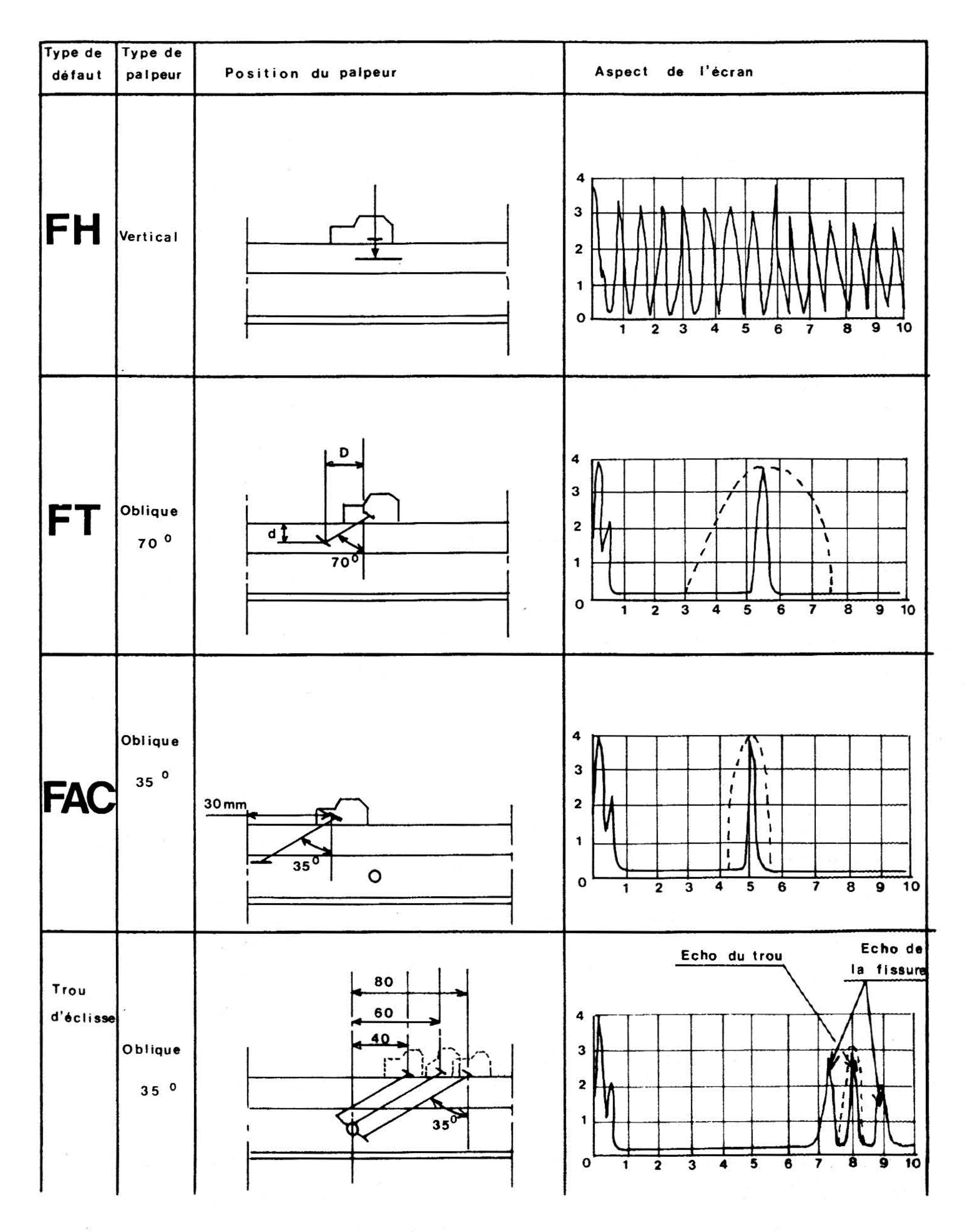


Fig. 182. — *Repérage des principaux types de défauts*

Grâce à un pont d'impédance, on peut mettre en évidence l'influence des défauts sur la bobine d'exploration en mode absolu ou différen-

tiel (fig. 183). L'impédance de la bobine est influencée à la fois par la taille des défauts et par la distance, variable, entre la sonde et le

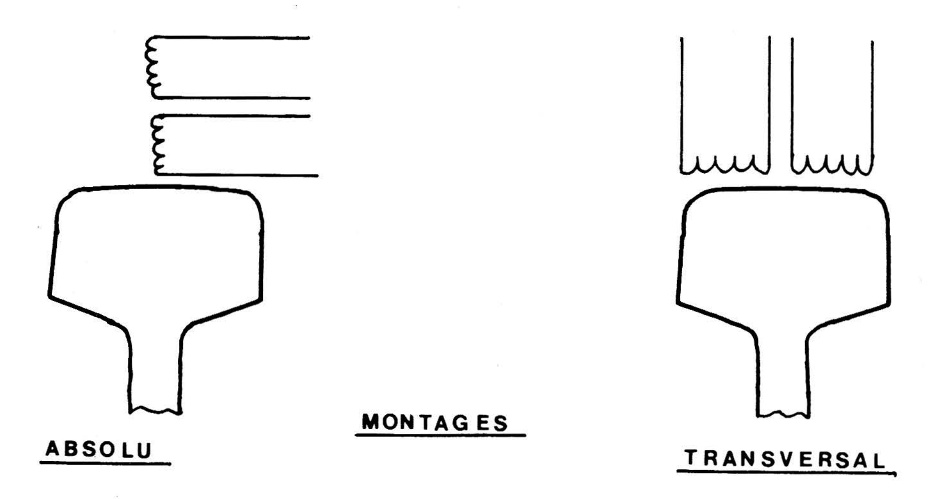


Fig. 183. — *Méthode différentielle d'emploi des courants de FOUCAULT*

rail (lift-off). Dans le plan complexe (fig. 184) ces deux effets sont perpendiculaires entre eux moyennant un choix adéquat des fréquences. On élimine l'influence du lift-off par projection des tensions de déséquilibre sur la direction correspondant à l'effet défaut. Néanmoins, la sensibilité de détection reste liée à la distance entre bobine et rail, qui doit donc être aussi petite et constante que possible.

L'amplitude des courants diminue de façon exponentielle lorsque la profondeur augmente : leur intensité, par exemple, est réduite à la moitié de sa valeur en surface à une profondeur de 0,6 mm pour un courant de fréquence 10 kHz et à 0,2 mm pour un courant de fréquence 500 kHz.

On conçoit donc que cette méthode d'auscultation ne concerne vraiment que les défauts de peau. Par ailleurs, les essais effectués en France ont montré que les dispositions de bobines les mieux adaptées à la détection des défauts de surface étaient celles de la figure 185 : 2 bobines l'une au-dessus de l'autre en mode absolu, deux bobines symétriques dans le plan perpendiculaire à l'axe du rail en mode différentiel. L'ensemble des défauts et en particulier les empreintes

L ω

Lieu de l'effet défaut

Δ L ω

Δ $\vec{Z}$ projeté

Δ $\vec{Z}$

Lieu de l'effet distance

A

Δ R

$\vec{Z}$

Fréquence = 100 kHz

R

Fig. 184. — *Diagramme des courants de FOUCAULT*

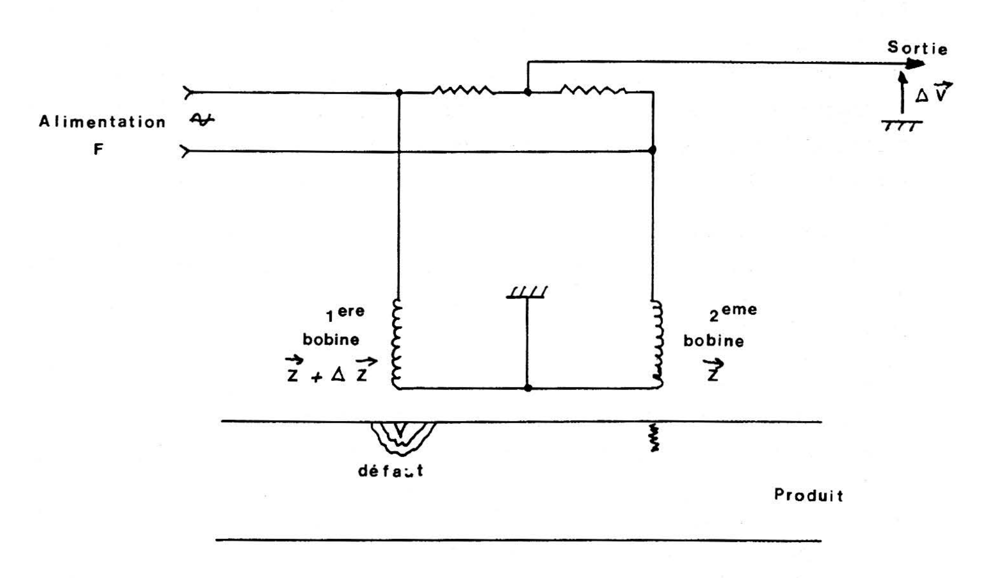


Fig. 185. — *Montage des ondes à courants de FOUCAULT*

de patinage sont bien détectés, les lignes métalliques ne le sont que si elles ont une profondeur suffisante (2).

Pour chaque paire de bobines, tout déséquilibre créé par un défaut entraîne une mesure d'impédance en amplitude et en phase. La combinaison dans une table de décision des valeurs obtenues permet de déterminer la nature et l'importance du défaut perturbateur.

5. Conception générale des engins d'auscultation

5.1. De l'analyse théorique que nous venons d'esquisser résulte que la conception des engins modernes de contrôle non destructif des rails repose sur l'utilisation systématique des ultrasons assistée pour les défauts de surface de dispositifs à courants de Foucault.

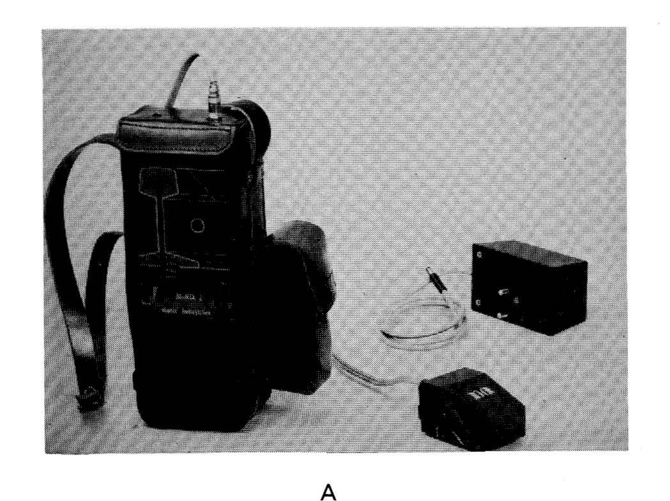
Nous nous appuierons, pour la description des dispositifs utilisés sur les réalisations faites en France par la société Matix Industries en liaison étroite avec la Division des Rails de la SNCF. En effet, cette société a d'une part mis au point la voiture la plus moderne et la plus complète existant sur le marché, la voiture V4 de la SNCF et d'autre part met à disposition de réseaux toute une gamme de produits de plus en plus sophistiqués, depuis le Minix, appareil portable dont le poids n'atteint pas un kilo jusqu'à la voiture V4, une caractéristique importante de tous ces appareillages étant de travailler en temps réel. Bien entendu, les performances des engins sont en liaison étroite avec leur complexité. Mais chaque réseau peut ainsi adapter ses moyens à sa taille et à ses besoins spécifiques.

5.2. Les principaux appareillages disponibles sont les suivants :

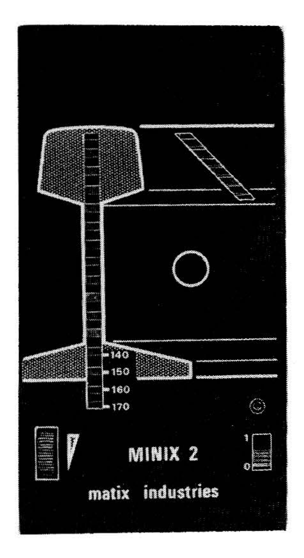
a. Le Minix, appareil portable (fig. 186) alimenté par piles et comprenant un palpeur double 0-70° relié à un boîtier sur lequel une double série de diodes électroluminescentes permettent de faire apparaître directement sur un profil de rail la position et la dimension des fissures verticales et horizontales éventuelles. Les deux contrôles, vertical et oblique, s'opèrent simultanément. D'un poids de 950 g

---

(2) Les lignes de très faible profondeur disparaissent généralement sous l'action du trafic.



A



B

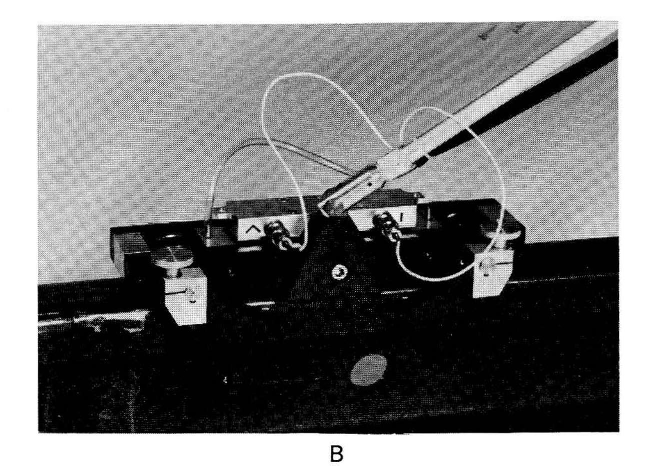
Fig. 186 A/B. — *Appareil MINIX*

avec une batterie rechargeable de 6 heures d'autonomie, le Minix fonctionne avec une fréquence d'émission de 4 MHz pour la sonde 0° et 2,5 MHz pour la sonde 70° avec une fréquence de récurrence de 150 Hz. Le Minix active un bruiteur à chaque défaut rencontré. En cas de besoin, il serait facile de concevoir un appareil analogue équipé de sondes de toute autre inclinaison, par exemple à 35° pour la recherche systématique des étoilures de trous d'éclisses. Outre son faible poids et sa bonne fiabilité, le Minix offre l'avantage d'un affichage direct des défauts sans interprétation, ce qui le rend utilisable directement par n'importe quel agent de la voie, sans aucune formation préalable.

b. Le Minix peut être monté sur une canne (fig. 187), la sonde portée par un petit chariot se déplaçant sur le rail. On peut éventuellement remplacer le Minix proprement dit par un appareil avec un écran cathodique sur lequel apparaissent ou disparaissent les échos ultrasonores éventuels. Mais il est nécessaire, dans ce cas, d'interpréter les résultats et par conséquent d'avoir à faire appel à un spécialiste. Si le Minix ne sert qu'à des contrôles ponctuels (par exemple confirmation des défauts signalés par les gros engins, soudures, talons d'aiguilles, etc.) et ne réclame qu'une faible quantité de liquide de couplage la canne nécessite le port par l'opérateur d'une nourrice en plastique d'une dizaine de litres d'eau.



A



B

Fig. 187 A/B. — *Canne de sondage*

c. Le bifile (fig. 188). Cet appareil un peu plus sophistiqué réunit deux sondes, une par file de rail et un chariot portant les écrans cathodiques d'interprétation, l'alimentation et la réserve d'eau. A la limite le bifile pourrait être mu par un petit moteur.

Le chariot bibile Matix BFX 21, porté par quatre roues est en alliage léger, afin d'être déraillable par deux personnes (poids total de 60 kg). Il est normalement équipé des éléments suivants :

— un sabot porte-palpeur pour chaque file de rails. Chaque sabot est en permanence centré sur le rail par un système de ressorts maintenant des galets au contact des faces intérieures des champignons des rails : la position des sondes est donc indépendante des mouvements de lacet du chariot. Chaque porte-palpeur est normalement équipé d'une sonde triple (0° + 2 × 70°) du même type que celle qui équipe les autres appareils Matix. Il peut bien sûr être équipé de toute autre type de sondes répondant à des besoins particuliers. Un mécanisme de commande à distance permet de relever les ensembles porte-palpeurs au passage des appareils de voie

— un réservoir d'eau de 5 l par file de rails, donnant une autonomie de l'ordre de 5 km

— une alimentation par batterie 12 V et 48 Amp.h. donnant environ 3 jours d'autonomie (3 × 6 heures)

— un coffre détecteur (fig. 189) équipé d'une base de temps, d'un émetteur-récepteur, d'un sélecteur et d'un moniteur vidéo avec réglage de créneaux et d'amplitude et alarme sonore

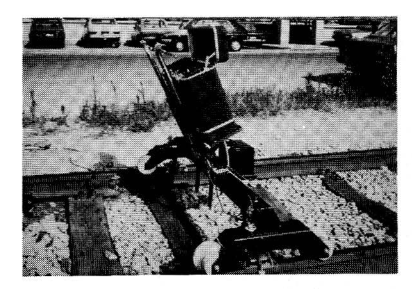


Fig. 188. — *Chariot bifile BFX/21*

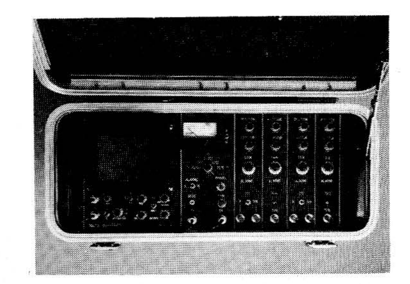


Fig. 189. — *Coffret détecteur du chariot bifile*

— un commutateur 4 voies permettant une exploration cyclique automatique des 4 voies de sondage (2 par file de rails). La fréquence de récurrence de 2000 Hz permet, à une vitesse de déplacement maximale de 3,6 km/h, un sondage pour chaque voie d'auscultation tous les 2 mm de rail.

d. Les draisines (fig. 190/191)

Les draisines équipées de dispositifs d'auscultation constituent une gamme supérieure, permettant une auscultation continue à une vitesse de l'ordre d'une vingtaine de km/heure. Les draisines peuvent être spécialement conçues pour l'auscultation ; on peut également équiper une draisine conventionnelle de dispositifs ad hoc suivant étude particulière. La draisine doit pouvoir être équipée d'un chariot porte-sondes, des tiroirs nécessaires à l'alimentation, l'émission, la récep-



Fig. 190. — *Draisine d'auscultation*

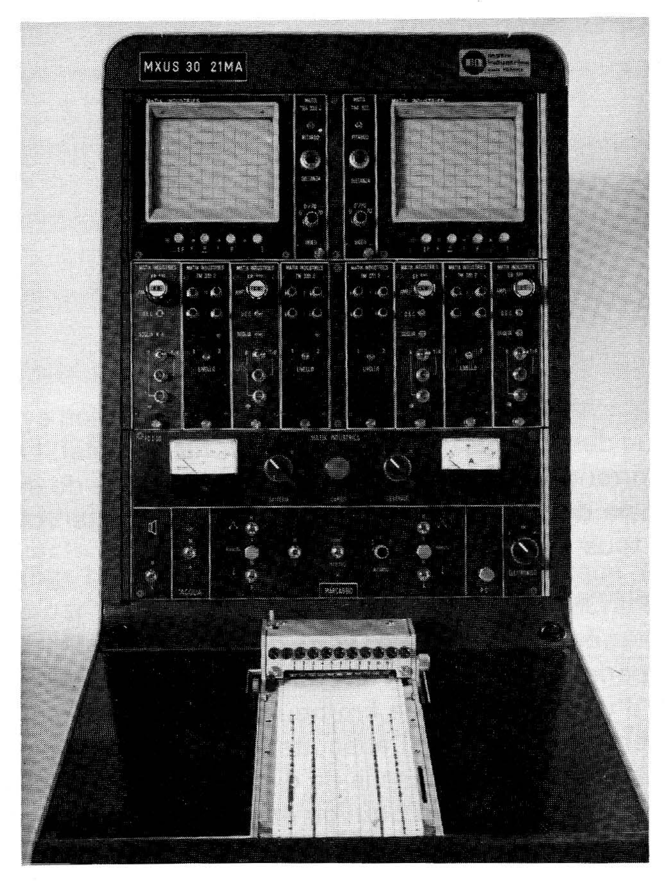


Fig. 191. — *Tableau de commande de la draisine d'auscultation*

tion et l'interprétation, du ou des dispositifs d'enregistrement et d'une réserve d'eau. Si la place manque, tout ou partie de ces éléments, en particulier le chariot et le réservoir d'eau, peuvent être portés par une remorque spécialement conçue à cet effet.

TABLEAU 30

N° UIC	Nature du défaut	SONDES						Observation visuelle	Indétectable	% d'apparition	Observations
		0°	$70°_C$	$70°_D$	35°	30°	CF				
111/211	tache ovale	x	1	x	x					13	Ces deux défauts peuvent être combinés
112/212	fissuration horizontale	1			x	x				6	
113/213	FVL champignon					1				0,6	
121/221	défauts de surface						1			2	
122/222.1	écaillage						1			3	
123/223	écrasement table de roulem[t]	x					x	x		6	La détection automatique dépend de l'importance du défaut
124/224	dénivellation locale	x					x	x		Σ	
125/225	empreinte de patinage						x	x		24	
132/232	fissuration congé âme-champignon âme-patin	1								7	
133/233	retassure	x	x		x					Σ	La détection automatique dépend de l'importance du défaut.
134/234	corrosion							x		1	
135	étoilure trous éclissage				1					0,8	
139/239	repliure							x		Σ	
153/253	F.V.L.	x			x			x		0,1	
154/254	corrosion patin							x		Σ	
200	rupture franche		x	x	x					Σ	
220/1.2	usure ondulatoire						x	x		1,8	
220.3	usure latérale							x		7	
220.4	usure verticale									Σ	Détectable par mesure de hauteur si nécessaire.
222.2	shelling			x				1		8	Détectable directement si nécessaire

TABLEAU 30 (suite)

		SONDES									
N° UIC	Nature du défaut	0°	$70°_C$	$70°_D$	35°	30°	CF	Observation visuelle	Indétectable	% d'apparition	Observations
235	fissuration autour de trous	1			1					0,3	
236	fissuration diagonale de l'âme	x			1					Σ	
301	blessures accidentelles	x	x	x	x		x			0,2	fonction de la nature et de la position
302	usinages intempestifs	1	x		1					Σ	
303	rail faussé							x	x	1,5	Difficile à détecter en courbe.
411 à 432	Soudures	1	1	x	x		x			13	Fonction de la nature et de la position
471/472	fissuration-écaillage sur rechargement	x	x	x			x			2,5	Fonction de la position.
481	fissuration sous connexion électrique	x	1	x	x					Σ	

NOTA : 1 Détection privilégiée - x Détection aléatoire

Les dispositifs Matix, qu'ils équipent une draisine ou une voiture ont l'avantage d'être modulaires : on peut donc compléter une installation initialement simple par des dispositifs plus complexes en fonction des besoins ou des disponibilités budgétaires, pourvu que la place correspondante ait été réservée à l'origine.

e. Les voitures (fig. 192)

L'équipement des voitures Matix est semblable à celui des draisines, les mêmes modules de base étant utilisés. Elles sont toutefois plus complètes, les chariots porte-sondes plus importants et la vitesse d'auscultation est plus élevée (40 à 50 km/h). Ces voitures peuvent

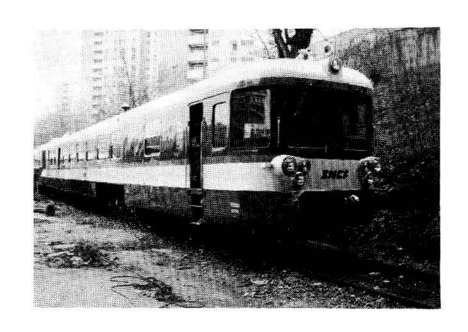


Fig. 192 A. — *Véhicule V4*

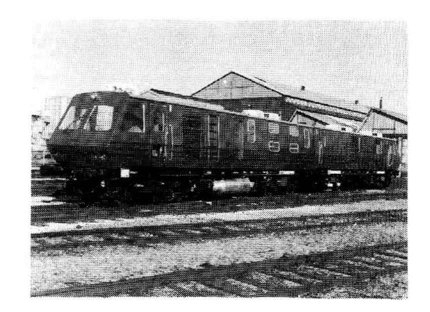


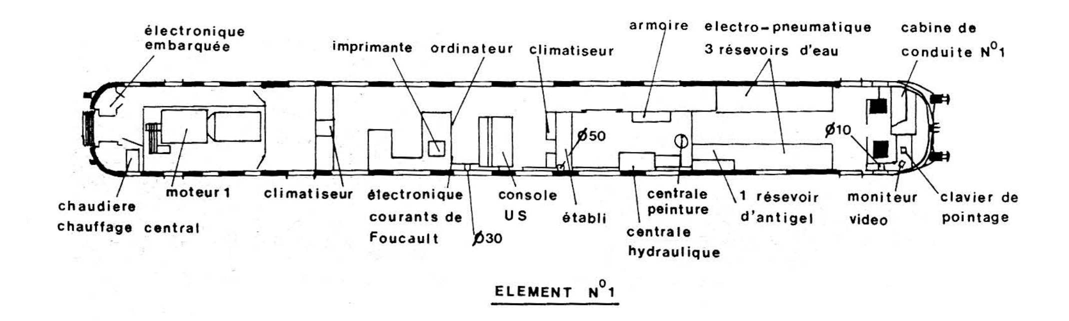
Fig. 192 B. — *Véhicule 505*

être simples ou doubles. Dans ce dernier cas, à la voiture-laboratoire d'auscultation vient s'adjoindre une voiture cantonnement (cuisine, couchette, douches, WC) qui donne une très grande souplesse au moyen d'auscultation. Il est souhaitable que ces véhicules disposent d'un mode de traction autonome (moteur diesel) ce qui améliore grandement les conditions d'emploi et les rend bi-directionnelles. Nous allons maintenant décrire les divers composants des draisines et des voitures. La figure 193 donne le schéma de la voiture V4 de la SNCF.

5.3. En fonction de l'importance de leur équipement de sondage, ces engins permettent la détection des défauts caractéristiques, liés à la nature des sondes employées.

Le tableau 30 donne la liste des défauts du catalogue UIC et le type de sondes capables de les détecter, ce qui permet d'orienter le choix des réseaux en matière d'équipement des engins d'auscultation.

Ce tableau montre également qu'un pourcentage de défauts (la colonne 2 correspond à celui de la SNCF pour l'année 1983) compris entre 80 et 90 % est en principe reconnu par l'engin le plus sophistiqué. Ce chiffre est encore plus élevé sur un réseau où les fissurations de trous d'éclissage seraient nombreuses car il est insignifiant sur la SNCF. On constate également que le nombre de défauts totalement indétectables (engin ou auscultation visuelle) est pratiquement négligeable. Les éléments de ce tableau sont fondamentaux pour apprécier la rentabilité de la détection automatique.



ø10 à ø50 = postes interphones

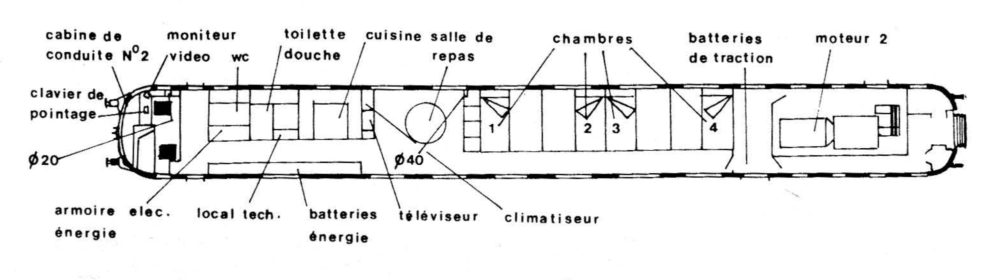


Fig. 193. — *Schéma du véhicule V4*

6. Conception technologique des véhicules

6.1. Les sondes

6.1.1. Les cristaux utilisés sont des céramiques synthétiques à base de titanate de baryum, métaniobate de plomb et zirconate ou titanate de plomb (PbZ_2O_3 et $PbTiO_2$). Leur conception et leur montage doivent permettre d'obtenir un faisceau aussi directif que possible avec le minimum d'interférences, dues à la géométrie même du cristal. Les palpeurs sont constitués par un ou plusieurs cristaux montés sur des amortisseurs, le tout étant coulé dans un bloc de matière plastique (fig. 194). Les amortisseurs, de caractère mécanique, permettent

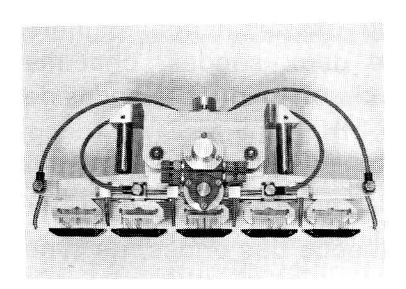


Fig. 194. — *Palpeur*

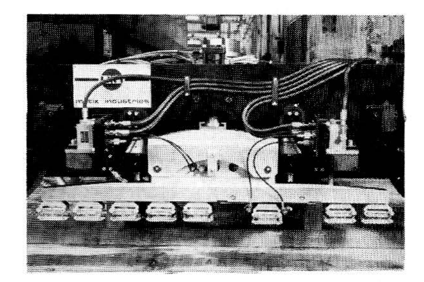


Fig. 195. — *Chassis porte-sondes*

d'avoir une impulsion aussi brève donc aussi fine que possible. Compte tenu de l'impédance acoustique de l'air et de l'atténuation aux fréquences utilisées (2 à 5 KHz), il est indispensable pour obtenir une bonne transmission acoustique d'interposer entre le capteur et le rail un film d'huile ou plus généralement d'eau qui assure un bon couplage entre les deux surfaces.

6.1.2. Les sondes utilisées par Matix Industries sont en titanate de baryum, noyées dans des blocs de plexiglas dont le permissif d'usure (3 mm) donne une autonomie de 1500 km avant addition d'une plaque de resurfaçage.

Le fonctionnement des diverses sondes (fig. 182) est le suivant :

a. 0°. Elle comporte un cristal émetteur et un cristal récepteur, afin d'augmenter considérablement le pouvoir de séparation de la zone de l'émission. La fréquence des ondes est de 4 MHz ; ce sont des ondes de compression (5800 m/s dans l'acier). On peut détecter des fissures de 4 mm de longueur à 40 km/h.

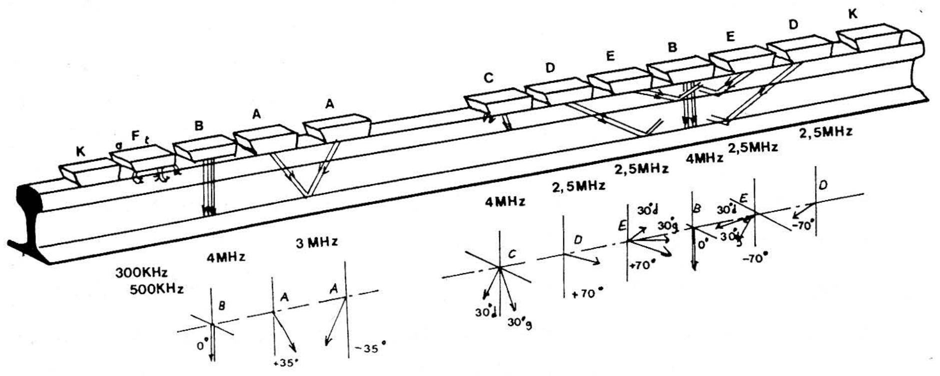
b. 70°. C'est l'angle de réfraction dans l'acier, les faisceaux étant dirigés dans le sens de marche du véhicule et en sens inverse. Le cristal fonctionnant par écho est unique (émetteur-récepteur). La fréquence est de 2,5 MHz, les ondes étant de type transversal (3130 m/s). On peut détecter des fissures de 3 mm de longueur à 40 km/h.

c. 35°. C'est l'angle de réfraction dans l'acier, les faisceaux étant dirigés vers l'avant et l'arrière. Le cristal est à la fois émetteur-récepteur, fonctionnant par écho et transparence. Les ondes transversales ont une fréquence de 3 MHz. Les seuils de mesure tiennent compte des diamètres des trous d'éclisses afin de ne pas considérer ces derniers comme des défauts.

d. 30° transversal (angle dans l'acier) qui explore le champignon. L'exploration sous cet angle comporte deux sondes, chacune émettrice-réceptrice explorant un côté du champignon. Les ondes de type transversal ont une fréquence de 4 MHz.

e. 70° inclinée. L'angle est celui réfracté dans l'acier. Les 4 sondes à double inclinaison permettent l'exploration vers l'avant et l'arrière, de chaque côté du champignon. La fréquence des ondes, de type transversal est de 2,5 MHz.

La précision des trois derniers types de sondes est la même que celle des sondes 0° et 70°. L'ensemble peut être regroupé sur le châssis porte-sondes comme représenté sur la figure 195.



(suite Fig. 195)

f. Courants de Foucault : l'utilisation simultanée de deux fréquences (50 et 200 KHz) permet une discrimination entre les signaux provenant de défauts de surface et ceux provenant de lacunes matérielles tels que les joints.

g. La fréquence de récurrence variable avec la vitesse permet un sondage tous les 4 mm du rail. Comme le diamètre des faisceaux est d'une vingtaine de mm, chaque section de rail est en moyenne auscultée cinq fois, ce qui permet d'une manière certaine un taux de recouvrement du sondage de 100 %.

Les divers types de sondes reconnaissent les principaux défauts dans les conditions déterminées par le tableau.

6.2. Chariots porte-sondes

6.2.1. Les sondes sont fixées sur des réglettes porte-sondes à raison d'une ou deux par file de rails suivant le nombre de sondes. Les porte-sondes sont fixées sur le chariot d'auscultation tout en conservant une double possibilité de déplacement, verticale et transversale. L'ossature du chariot est constituée par un cadre en charpente métallique dont l'importance est fonction du nombre de sondes de l'engin d'auscultation : si ce nombre est relativement faible, le chariot peut prendre place à l'intérieur de l'un des bogies du véhicule d'auscultation : l'entraxe des essieux du bogie pouvant atteindre de 2,5 à 3 mètres. Le chariot est alors rigidement relié au bogie par un ensemble de pivots : il repose sur la voie par 4 roues sans boudins entre lesquelles se trouvent les porte-sondes (fig. 195/196).

Au-delà de 6 à 7 sondes par file de rails, il n'est plus possible d'insérer les porte-sondes à l'intérieur d'un bogie ; il faut donc équiper la voiture d'un chariot placé entre les essieux ou les bogies du véhicule (fig. 197). Ce chariot relié à la caisse de la voiture par un ensemble de 4 vérins et un timon rendant ses mouvements indépendants de ceux de la caisse, roule sur les rails par le jeu de 4 roues à boudin de diamètre réduit. Enfin, dans le cas où le nombre de sondes atteint la dizaine, il paraît intéressant de découpler le chariot en deux demi-ensembles, munis chacun de 2 roues à boudin à l'extérieur et de 2 roues ordinaires à l'intérieur (fig. 198). Les porte-sondes sont placés entre chacun des deux groupes de roues, les roues sans boudins se relevant pour la marche haut-le-pied.

Les porte-sondes sont, dans toutes les solutions, appliqués sur le rail par des vérins et guidés le long du flanc de roulement du rail par des roues palpeuses, chacune étant solidaire au droit du rail opposé d'un ski de guidage destiné à assurer sans dommage le franchissement des lacunes des appareils de voie grâce aux contre-rails de protection de pointe.

Les chariots peuvent occuper trois positions :

a. auscultation : la totalité des roues du chariot roule sur les deux files de rails. Les sondes sont appliquées sur le rail et assurent l'enregistrement.

b. franchissement des appareils de voie : pour éviter tout accrochage des sondes dans la lacune, le porte-sondes est relevé de quelques millimètres ; le mouvement est commandé automatiquement par une

sonde spéciale (une par sens de marche et par file de rails à l'avant du véhicule) qui reconnaît la présence du cœur de l'appareil (lacune ou acier HADFIELD amagnétique). Le relevage ne s'opère ainsi que du côté cœur en moins d'1/10e de seconde.

c. marche haut-le-pied : pour rouler en toute sécurité à des vitesses de l'ordre de 100 à 140 km/h, le chariot doit être totalement relevé (ou tout au moins dans sa partie centrale pour le chariot dédoublé). Un verrouillage automatique par vérins garantit le maintien en position haute du chariot pendant le roulement.

A chaque extrémité des poutres porte-sondes, on peut disposer une sonde factice en acier dur qui protège les sondes en plexiglas contre les blessures pouvant provenir de languettes de métal provenant d'écaillages à la surface du rail.

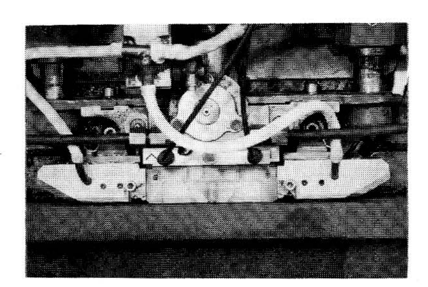
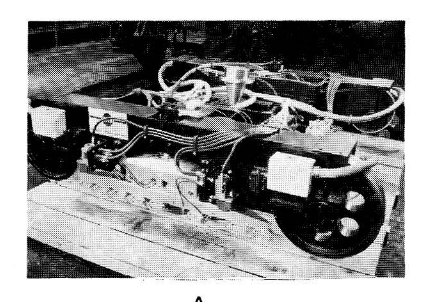
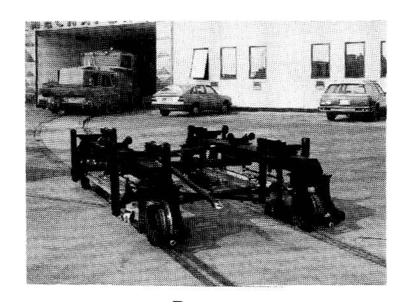


Fig. 196. — *Chariot de draisine*



A

Fig. 197 A/B. — *Chariot du véhicule 505*



B

(suite Fig. 197)

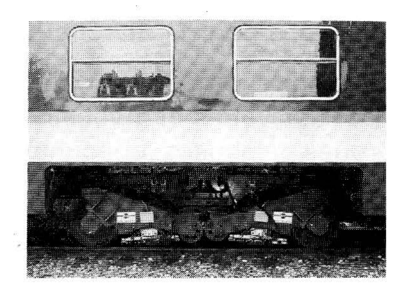


Fig. 198. — *Chariot double*

La précision et la fiabilité obtenues par toutes les sondes sont en liaison étroite avec leur position sur le rail. Dans le cas d'un sondage vertical (0°) par exemple, il est essentiel que la sonde soit bien centrée sur l'axe du rail pour permettre une exploration jusqu'au patin.

Les dispositifs classiques de butée par vérins sur la face intérieure du champignon ou de centrage manuel à distance sont très insuffisants, car liés à l'usure du rail ou à une observation visuelle incompatible avec une vitesse élevée de sondage. De même, deux sondes travaillant en échos (35°) doivent être placées à une distance l'une de l'autre fonction de la hauteur du rail donc du type du profil et de l'usure. L'axe des sondes doit être déplaçable longitudinalement (fig. 199). A cet effet, Matix Industries a breveté des systèmes réglant automatiquement les positions des sondes par mesure du maximum d'intensité du faisceau ultrasonore réfléchi. Les sondes commandées par vérins ou moteur pas à pas sont donc toujours en position optimale pour obtenir le maximum d'efficacité.

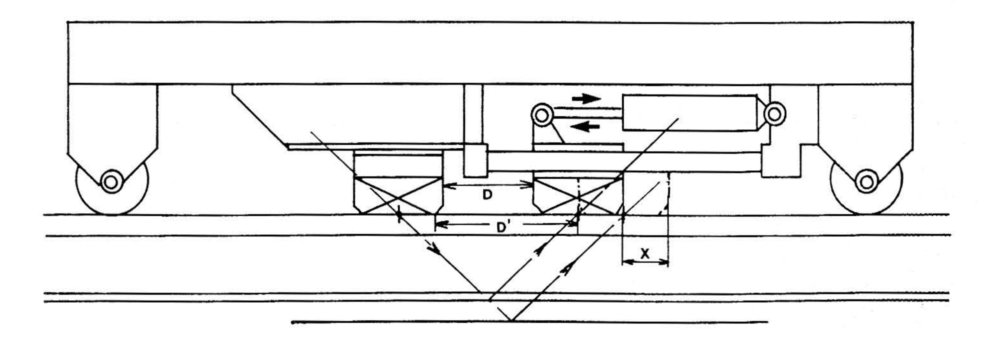


Fig. 199. — *Schéma de déplacement longitudinal des sondes*

6.2.2. La transmission dans le rail des ondes ultrasonores émanant des pastilles émettrices réceptrices peut se faire par deux moyens :

— incorporation dans un bloc de plexiglas pouvant s'articuler autour de deux axes perpendiculaires, un longitudinal et un transversal et apte à se déplacer orthogonalement à la surface de roulement du rail (fig. 200).

Le contact avec le rail est assuré par un film d'eau. En effet, les essais d'incorporation de sondes dans une membrane plastique déformable remplie d'un liquide n'ont pas été concluants pour le contrôle à haute vitesse.

— incorporation dans une roue en plastique remplie de liquide (en principe de l'eau).
Mais ce deuxième système présente de multiples inconvénients par rapport au premier (fig. 201).

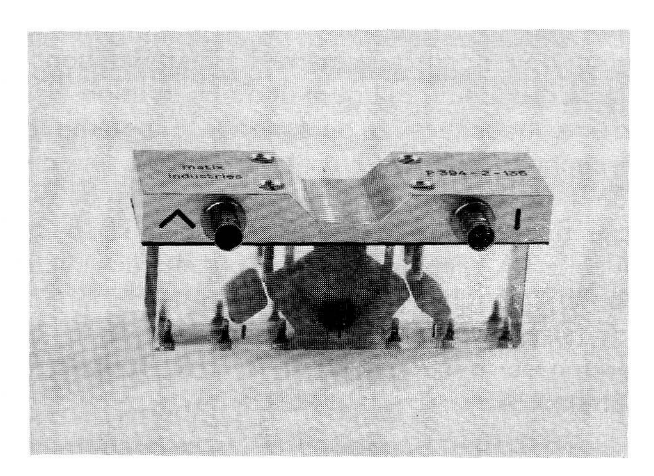
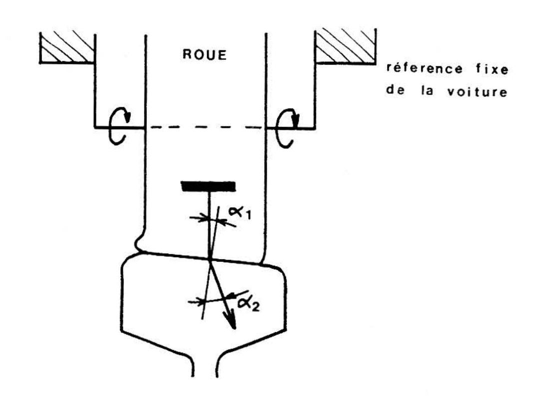


Fig. 200. — *Sonde*



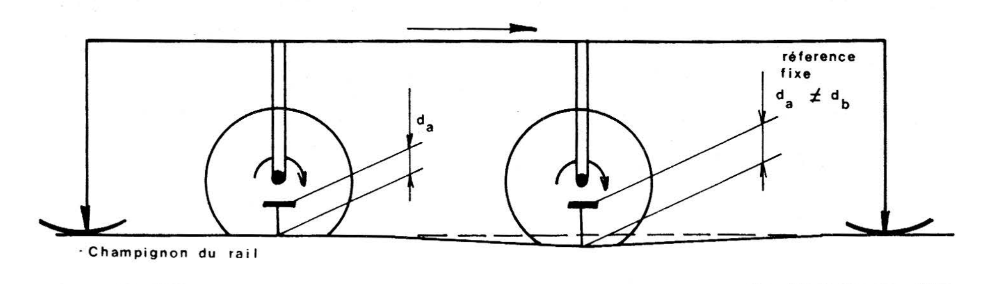


Fig. 201. — *Inconvénients de la roue palpeuse*

— La fixation de l'axe de rotation ne permet pas une orientation constante de la sonde par rapport à la surface de roulement du rail dont l'inclinaison est fonction de l'usure. Les inégalités longitudinales de rail se traduisent par des déformations de la roue palpeuse, d'où une variation de longueur du faisceau amplifiée du fait que la vitesse de l'onde dans l'eau est 4 fois plus faible que dans l'acier.
— L'épaisseur d'eau à traverser empêche une adaptation constante à la vitesse du véhicule de la fréquence de récurrence d'émission des ondes. Elle augmente sensiblement le temps de réponse et limite la vitesse à 25 km/h du fait des temps nécessaires à l'expiration des échos dus aux parcours multiples de l'onde dans le rail.
— La rotation de la roue entraîne inévitablement l'apparition dans le liquide de remplissage de cavitations qui sont à l'origine d'échos parasites.
Ces inconvénients diminuent fortement la précision et la fiabilité de la détection par roue palpeuse dont la seule justification reste dans des voies en très mauvais état d'entretien, ce qui doit en fait rester une exception.

6.3. Chaîne de traitement

6.3.1. L'ensemble électronique de traitement comprend un certain nombre d'éléments de base concrétisés par des tiroirs de conception modulaire et permettant ainsi une adaptation standardisée des modules utilisés aux besoins. Chacun des canaux de sondage est identique pour chaque file de rails. Le schéma de la figure 202 représente la configuration générale du système qui comprend :

a. des éléments communs à l'ensemble des voies de mesure :
— alimentation en énergie électrique
— générateur d'impulsions lié à la vitesse du véhicule
— centrale de synchronisation
— tiroir de simulation
— dispositif de localisation automatique (PK, joints, poteaux caténaires) ou manuel (ponts, tunnels)

b. des éléments propres à chacune des voies. Chaque voie (0°, 70° etc.) est composée d'une chaîne comprenant un émetteur-récepteur, une ou plusieurs sondes, une base de temps, un sélecteur et éven-

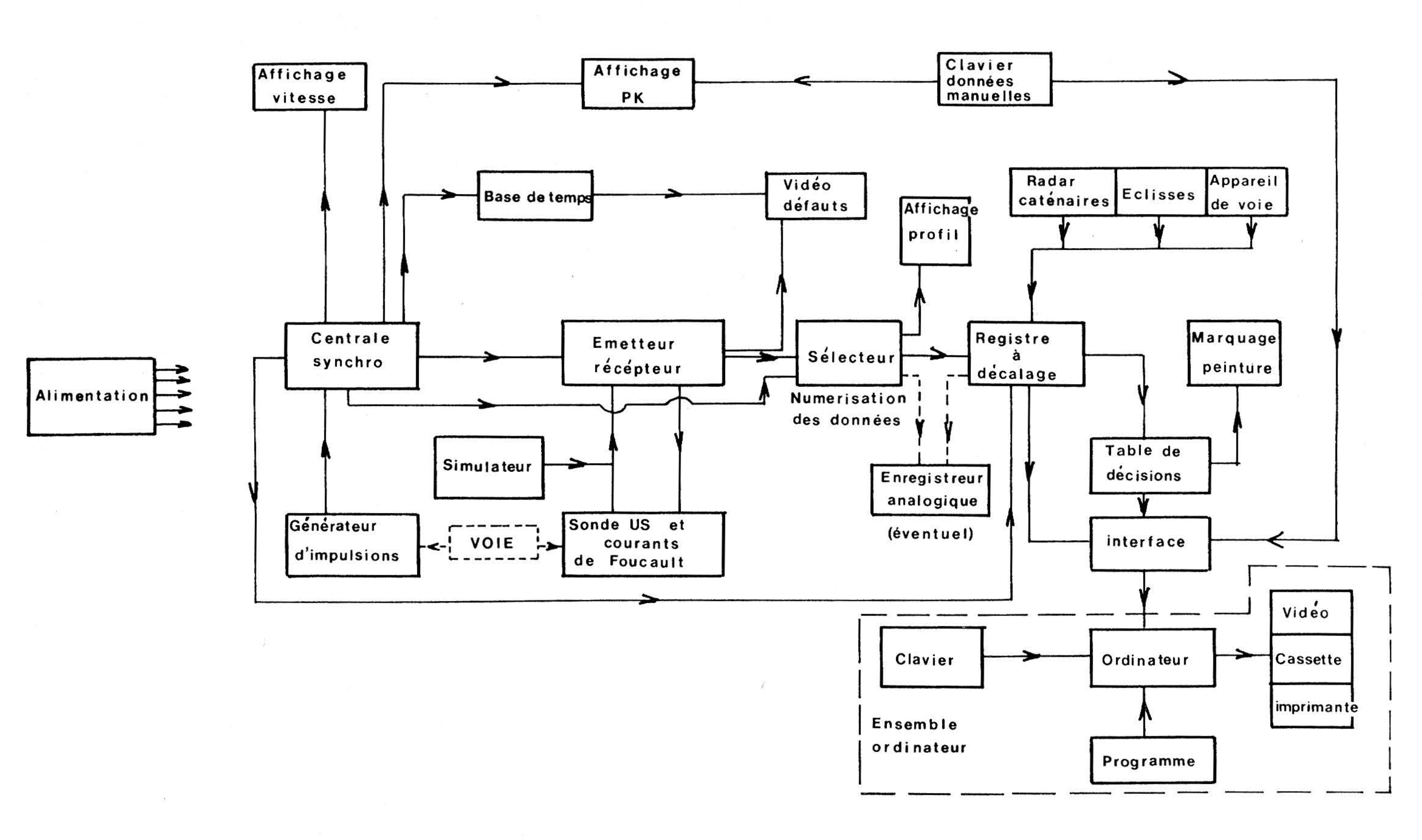


Fig. 202. — *Schéma d'ensemble du système électronique de sondage*

tuellement un moniteur vidéo. La base de temps permet le réglage de chaque chaîne en fonction de l'épaisseur de métal traversé. Les sélecteurs permettent de définir des "fenêtres" à l'intérieur desquelles sont recherchés les défauts. Ils numérisent en outre les données qu'ils contrôlent afin de les adapter à la suite du traitement. Les écrans vidéo peuvent être communs à plusieurs chaînes et par conséquent commutables : on peut y sélectionner la position et l'amplitude des échos à faire apparaître.

c. un dispositif de traitement commun : registre à décalage, table de décision et une interface avec des dispositifs communs permettant :

— l'enregistrement analogique
— l'enregistrement numérique
— le marquage sur rails des défauts par jet de peinture

6.3.2. Nous allons passer en revue ces divers éléments dont chacun est concrétisé par un tiroir modulaire (fig. 203).

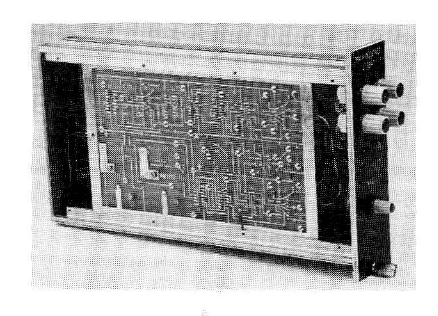
6.3.2.1. Alimentation. La puissance nécessaire à l'installation électronique varie de 2 à 6 kW suivant l'importance du véhicule. Elle est fournie sous les formes nécessaires aux différentes fonctions : 220 V alternatif, ± 5 V, ± 12 V, + 300 V continu, l'ensemble de ces tensions étant stabilisé.

6.3.2.2. Générateur d'impulsions. Ce dispositif génère des impulsions en fonction de la vitesse du véhicule qu'elle fournit à la centrale de synchronisation qui peut ainsi délivrer des tops aux tiroirs des chaînes de mesure, afin d'adapter la fréquence de récurrence à 4 mm de parcours du véhicule quelle que soit sa vitesse.

6.3.2.3. Centrale de synchronisation. La centrale de synchronisation est un multiplexeur qui délivre aux divers tiroirs et en particulier aux émetteurs récepteurs les signaux nécessaires aux moments opportuns. Cette centrale reçoit des impulsions provenant du générateur (6.3.2.2.).

Le tiroir Centrale Synchro fournit tous les signaux en phase et sous forme utilisable par tous les tiroirs de l'équipement électronique.

Deux principes d'exploitation différents sont appliqués :
— interne (horloge électronique) pour la simulation



A



B



C



D

Fig. 203 A/B/C/D. — *Tiroirs modulaires*

— externe, en marche normale, sous l'action du générateur à impulsions.

Un réglage "Vitesse" permet de modifier la vitesse de mesure en phase de simulation.

Cette centrale comporte en outre :

— des circuits diviseurs de la fréquence interne ou externe de base Ho, avec sortie vers les buffers.

La face avant de ce tiroir comporte :

— un contacteur km/miles qui commute la tension "vitesse" pour l'affichage et le circuit de marquage

— un bouton inverseur "interne-externe" pour les 2 modes de fonctionnement de la synchronisation

— un vernier "vitesse" dans la gamme 0-50 km/h.

6.3.2.4. Base de temps

Ce tiroir dont le fonctionnement est synchronisé à partir de la centrale avec une fréquence de récurrence variable de 1 000 à 5 000 Hz comporte :

— un intégrateur avec réglage par potentiomètre correspondant à des épaisseurs de 50 à 250 mm d'acier, liées aux dimensions du rail ausculté

— des circuits amplificateurs de mise en forme des "dents de scie" et un signal d'allumage pour commander le tube cathodique

— un potentiomètre multitours pour la commande de l'épaisseur d'acier à traverser.

6.3.2.5. Affichage cathodique

Ce tiroir comporte sur sa face avant, en plus de l'écran, les réglages de luminosité, de concentration et de cadrage horizontal et vertical. L'affichage des créneaux dans lesquels on recherche les défauts, réglable en position et en largeur, se fait par surbrillance.

6.3.2.6. Émetteur-récepteur

Chacun de ces tiroirs a deux fonctions :

— la partie "émetteur" permet l'excitation des sondes entre 2,5 et 5 MHz sans commutation de fréquence (2,5 MHz pour les sondes 70°, 3 MHz pour les sondes 35° et 4 MHz pour les sondes 0°).

— la partie "réception" permet l'amplification des échos recueillis entre 2,5 et 5 MHz sans commutation de fréquence

En face avant de ce tiroir sont incorporés :

— 1 potentiomètre pour le réglage du seuil vidéo visible sur l'écran cathodique

— 1 potentiomètre pour le réglage du gain de l'amplification HF gradué en dB

— 1 inverseur écho-réception pour les modes de fonctionnement

— 2 prises pour la connexion des capteurs émetteur et récepteur

6.3.2.7. Affichage vidéo

La partie commutation d'affichage a pour but de répartir les signaux de synchronisation, les vidéos et les créneaux de sélection dans le cas d'utilisation en multi-canaux.

La face avant comporte un contacteur avec repères permettant d'effectuer le choix de la voie à visualiser : soit en mode automatique alterné, soit en mode manuel.

6.3.2.8. Tiroir sélecteur 0°

Chaque tiroir sélecteur a pour fonction de
- générer des créneaux de sélection
- détecter les échos utiles
- supprimer certains parasites
- fournir des informations à partir de seuils analogiques et numériques
- transmettre une information de nature binaire à l'extérieur pour commande de puissance

Le tiroir 0° comporte 5 circuits de sélection différents pour la prise en compte des données, chaque circuit correspondant à une zone possible de défauts dans la hauteur du rail.

Chacun d'eux comprend :
- 1 créneau de détection pour une épaisseur d'acier de 200 mm
- 1 circuit de coïncidence défaut-créneau et un circuit vidéo à seuil
- 1 circuit de mise en forme
- 1 diode électroluminescente par créneau, affichant l'éventuelle détection correspondante.

L'affichage des créneaux est réalisé par groupes (1 - 3 - 4) et (2 - 5), l'extrémité d'un créneau coïncidant avec le début du suivant.

Dans le créneau N° 2 (dont la position correspond aux trous d'éclisses) un circuit soustracteur interne réduit automatiquement les valeurs de 30 à 40 mm.

La face avant du tiroir comporte :
- 5 diodes électroluminescentes pour l'affichage des détections
- 5 potentiomètres de réglage des niveaux de détection
- 1 inverseur pour affichage des 2 groupes de créneaux (1 - 3 - 4 et 2 - 5)
- les réglages respectifs de tous les créneaux sur les circuits intermédiaires
- un potentiomètre pour le réglage unique de l'ensemble des créneaux.

6.3.2.9. Tiroir sélecteur 35°

Ce tiroir comporte 3 caneaux différents pour la sélection et la détection des défauts orientés à 35°.

Les échos des canaux x et y (+35° et −35°) sont mis en coïncidence durant chaque phase de mesure correspondante (fig. 204). A chaque canal est affecté un créneau (1 et 3 pour l'apparition d'échos, 2 pour la disparition).

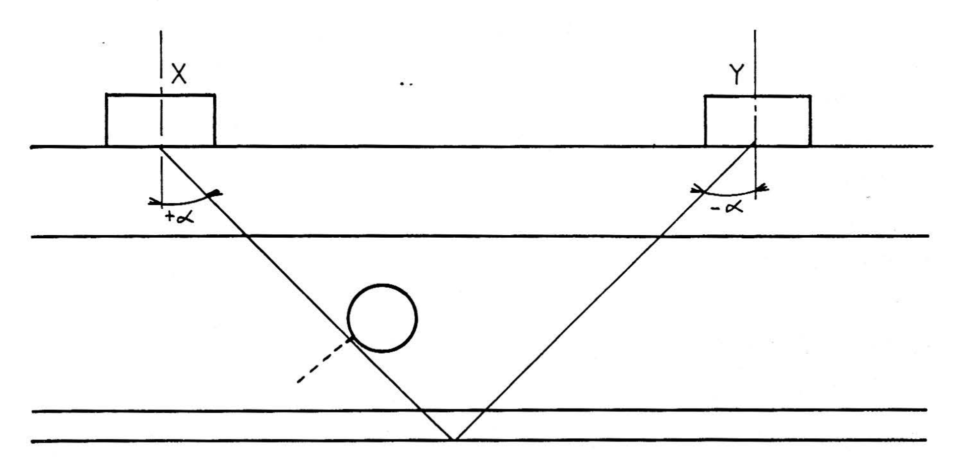


Fig. 204. — *Schéma de fonctionnement des sondes à 35°*

Un circuit soustractif à affichage numérique contrôle l'ensemble des canaux et permet de régler le système suivant le diamètre des trous d'éclisses qui ne doivent pas être considérés comme des défauts.

La face avant de ce tiroir comporte des boutons de réglage des extrémités de chaque créneau ainsi que 3 diodes électroluminescentes donnant une indication de détection pour chacun des créneaux en relation avec les trois réglages de seuils.

6.3.2.10. Tiroir sélecteur 70°

Le créneau est émis sous forme numérique, ce qui permet une analyse directe de la mesure, donc de la dimension et de la position du défaut dans la hauteur du rail. Le circuit "mesure" lui-même est double, un par sonde.

Un circuit interne, réglable, élimine les impulsions aléatoires qui sont possibles du fait du fonctionnement en apparition d'échos.

Un circuit ''mémoire'' enregistre le début et la fin de chaque défaut et adresse au tiroir d'interface les données numériques de la mesure correspondante.

La face avant de ce tiroir électronique comporte :

- un bouton de réglage de début du créneau correspondant à une épaisseur d'acier comprise entre 20 et 100 mm
- un bouton de réglage de l'extrémité du créneau correspondant à une épaisseur d'acier de 40 à 200 mm (la profondeur de la zone sondée dans le champignon étant toujours divisée en 15 parties égales quelle que soit sa largeur)
- un potentiomètre pour le réglage du seuil vidéo
- 1 diode électroluminescente pour l'indication de l'apparition d'un écho pour la mesure.

6.3.2.11. Tiroir sélecteur 30°

Ce tiroir électronique comporte des créneaux travaillant en synchronisme avec les faisceaux correspondants.

Ces circuits fonctionnent suivant le mode ''disparition'' et un réglage numérique permet de fixer la valeur minimale à mesurer. La face avant de ce tiroir comporte :

- 1 potentiomètre pour le réglage du niveau de détection vidéo
- des boutons de réglage de début et de fin de créneaux
- 2 diodes électroluminescentes indiquant l'éventuelle présence d'écho dont l'amplitude est supérieure au seuil de détection
- 1 compteur interne mesurant la longueur de disparition.

6.3.2.12. Tiroir de simulation

Ce tiroir émet des signaux semblables à ceux qui sont reçus par les sondes, en fréquence, nombre, distance et vitesse. Cette unité permet un parfait étalonnage de la totalité du système (mesure, marquage, enregistrement analogique, traitement automatique des données).

Elle émet des signaux correspondant aux fissures transversales ou horizontales et aux étoilures de trous d'éclisses dont les dimensions sont réglables entre 1 et 99 unités, avec affichage en mm ou en pouces.

Les échos sont de type ''apparition'' ou ''disparition''. La synchronisation de ces fonctions est obtenue suivant le canal choisi au moyen d'un commutateur.

La face avant de ce tiroir comporte les dispositifs de réglage ad hoc :

— 2 boutons pour le réglage de l'indication de la longueur du défaut
— 1 commutateur rotatif pour le choix du type du défaut
— 1 inverseur pour la direction de déplacement des échos en cas de sondage oblique (de gauche à droite ou de droite à gauche)
— inverseur à 3 positions : automatique, arrêt, pas à pas
— 1 bouton de réglage de la distance de l'origine du défaut
— 1 bouton de réglage de la fin du défaut
— 1 bouton de réglage de la distance de l'écho fixe
— 1 bouton de réglage de l'amplitude des impulsions
— 1 prise de sortie de ces impulsions

6.3.2.13. Dispositifs de localisation

Ils sont de deux natures, automatiques ou manuels, leur but étant de déterminer en voie une série de repères par rapport auxquels on peut coter la position des défauts, donc les retrouver sans difficulté.

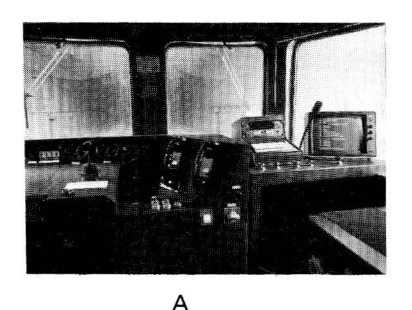
On détermine automatiquement :

— la position des joints éclissés qui ne sont pas reconnus comme défauts
— les appareils de voie grâce à une sonde magnétique qui détecte soit les lacunes, soit les cœurs en acier Hadfield qui est amagnétique et apparaît ainsi comme une lacune. Cette détection permet le relevage automatique du support porte-sonde au franchissement des appareils de voie (côté lacune exclusivement)
— les poteaux caténaires grâce à un système radar installé sur le toit du véhicule fonctionnant par effet Doppler Fizeau à 24 GHz.

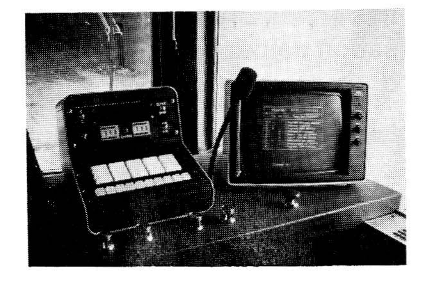
On pointe manuellement à l'aide de deux claviers placés à chacune des cabines d'extrémité du véhicule (fig. 205) les points singuliers (ponts, tunnels, etc.) et les points kilométriques. Sur les réseaux qui seraient dotés de balises magnétiques de position de ces PK, le pointage peut se réaliser automatiquement.

6.3.2.14. Registre à décalage

Les sondes fournissent leurs résultats d'évènement commun dans



A



B

Fig. 205 A/B. — *Cabine de pilotage*

le rail l'une après l'autre. Il est donc nécessaire que les impulsions réelles de détection soient toutes ramenées en un point fictif commun permettant d'une part de fixer ne variatur la position du défaut ou de l'information donnée et d'autre part d'analyser simultanément les informations apportées par les diverses sondes au passage d'un point singulier (joint ou défaut par exemple).

6.4. Analyse des données

6.4.1. Table de décision. Jusqu'à une époque récente, l'analyse des impulsions dues aux défauts se faisait analogiquement par un opérateur. Il est apparu plus sûr et plus efficace de procéder à une reconnaissance automatique par le biais d'une table de décision programmable à l'avance par le moyen de clés permettant d'agir sur les paramètres des équations logiques reliant les défauts et les données des sondes en fonction des caractéristiques particulières de telle ou telle partie du réseau. Cette table reçoit la totalité des informations mémorisées en provenance du sélecteur de chaque voie et transmet à l'ordinateur par l'intermédiaire d'un buffer (interface) la nature, la position et les dimensions de tous les défauts et particularités (joints par exemple) qu'elle a reconnus.

6.4.2. Marquage peinture

Tout défaut reconnu comme tel fait l'objet du déclenchement d'un jet de peinture projeté à l'air comprimé sur la face supérieure du patin du rail. Le trait de peinture de 0,50 m de longueur se trouve toujours

à cheval sur l'emplacement exact du défaut permettant une recherche facile par les agents de la maintenance de la voie.

6.4.3. Enregistrement des défauts

Cet enregistrement se présente sous deux aspects : analogique et automatique.

6.4.3.1. L'enregistrement analogique (fig. 206) se fait soit à l'intérieur du véhicule, soit aux extrémités dans les cabines de conduite. Dans ce dernier cas, chacun des deux postes d'enregistrement analogique situés aux extrémités du véhicule comprend généralement 25 pistes, soit 11 affectées à chacune des deux files de rails, les trois dernières étant relatives à l'indication du kilométrage et des points singuliers ainsi qu'au marquage par jet de peinture. Les enregistreurs, entraînés mécaniquement, assurent le déroulement de bandes de papier à 2,5 ou 5 mm par mètre de voie. Ces postes d'enregistrement permettent aux opérateurs de repérer les défauts, à la cadence du défilement de la bande de papier. On constate que ce repérage suppose une interprétation permanente des enregistrements graphiques qui requiert une formation particulière des opérateurs. Elle comporte donc des risques d'erreur nécessitant de la part des opérateurs une attention soutenue, de plus en plus incompatible avec l'augmentation de la vitesse d'auscultation et une solide formation technique. L'interprétation de la bande en laboratoire pratiquée par certains réseaux nécessite un délai, à notre avis, incompatible avec le risque d'évolution en ruptures de certaines fissurations dangereuses.

6.4.3.2. L'enregistrement automatique lève toutes ces difficultés. L'ordinateur (fig. 207) alimenté par l'ensemble des données fournies par la table de décision et par la connaissance de la position des véhicules sur la voie permet l'édition par une imprimante alphanumérique rapide (vitesse de 360 à 480 caractères par seconde) d'une liste complète des informations recueillies par la voiture.

6.4.3.3. L'imprimante transcrit sur papier listing, en plusieurs exemplaires, les données fournies par le micro-ordinateur (fig. 208). Chaque ligne correspond à une information, défaut, joint, disparition de sondage, etc.

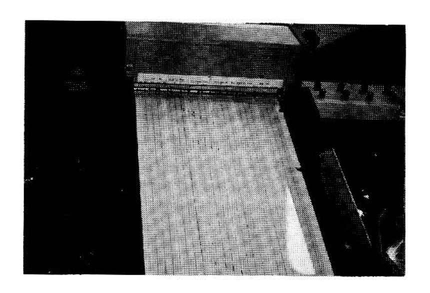


Fig. 206. — *Enregistreur analogique*

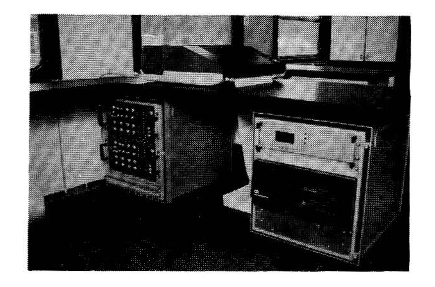


Fig. 207. — *Ordinateur de bord*

Une ligne correspondant à un défaut contient, de gauche à droite, les indications possibles suivantes :

— localisation topographique en valeur métrique (par exemple PK 271.616)

— observations (par exemple FHT pour défaut composé)

et par file de rails :

— colonne des défauts horizontaux : nombre de défauts au point kilométrique indiqué, situation dans la hauteur du rail et longueur en millimètre du défaut le plus important dans le segment de 1 m correspondant

— colonne des défauts transversaux dans le champignon : nombre de défauts au point kilométrique indiqué, limites inférieure et supérieure (profondeur dans le champignon) et valeur en pourcentage, par rapport à la section du champignon, du défaut le plus important dans le segment de 1 m correspondant

— colonne des étoilures et défauts incurvés dans l'âme : mêmes indications que celles dans la colonne des défauts horizontaux sauf celles de l'emplacement vertical puisque ces défauts se trouvent dans l'âme.

Toute interruption du sondage pour une raison quelconque, par exemple rupture momentanée du couplage acoustique ou cause métallurgique (retassures) est signalée immédiatement par l'équipement.

6.4.3.4. Avant le contrôle d'une section de voie, l'opérateur dialogue avec le mini-ordinateur par l'intermédiaire d'une console alphanumérique et d'un écran de visualisation pour faire une check list et pour introduire les paramètres propres à l'auscultation à réaliser : la date, le numéro de la ligne, le sens de déplacement de la voiture, le

```
PROGRAMME:2

ORIGINE POINTEUR   :10
SENS   :CROISSANT

AFFECTATION DES MEUBLES:
          FILE GAUCHE  :MEUBLE ?  1        FILE DROITE  :  MEUBLE 2

VERIFICATIONS AVANT DEPART  :
NIVEAU D EAU :BON
CHARIOT PRET :BON
ECHO DE FOND :
MEUBLE 1:XXX                               MEUBLE 2:XXX

AFFICHAGE PK DEPART EN METRES ?0           030663

PRET POUR LES MESURES ?0
************************************************************************************
*        **            **  FILE    GAUCHE : G    **   FILE    DROITE : D   *
*   PK   **OBSERVATIONS**  FH   *   FT     *  ET   **  FH   *   FT     *  ET   *
*        **            **       *          *       **       *          *       *
************************************************************************************
*T030663 *** 030674 **           **01 024 *        *       **       *          *       *
* 030680 **JT G   JT D **       *          *01 025 **       *          * 01 049*
* 030698 **JT G   JT D **
* 030706 **FHTG        **02 016 *1 01 02 06*       **       *          *       *
* 030716 **JT G   JT D **
* 030717 **            **01 008 *          *       **       *          *       *
* 030722 **            **02 008 *          *       **       *          *       *
* 030734 **JT G   JT D **       *          *       **       *          * 01 045*
* 030744 **JT G   JT D **       *          *       **       *1 01 05 26*       *
* 030749 **       JT D **       *          *       **       *          * 03 021*
* 030750 **            **       *1 02 13 74*       **       *          *       *
* 030756 **JT G   JT D **       *1 05 06 06*       **       *2 13 01 80*       *
* 030766 **JT G        **
* 030769 **            **       *          *       **       *          * 01 009*
* 030772 **            **       *          *       **       *1 03 01 13*       *
* 030774 **JT G   JT D **       *          *       **01 008 *1 01 00 06*       *
* 030777 **            **       *          *       **01 060 *          *       *
* 030788 **            **       *1 10 01 60*       **       *          *       *
* 030792 **JT G   JT D **       *          *       **       *1 12 00 80*       *
* 030795 **            **       *          *       **       *2 12 01 74*       *
* 030808 **            **       *1 03 13 67*       **       *          *       *
* 030810 **JT G   JT D **       *          *       **       *1 13 01 80* 01 049*
* 030821 **            **01 012 *          *       **02 020 *          *       *
* 030826 **            **       *2 09 05 26*       **       *          *       *
* 030827 **JT G   JT D **
* 030828 **            **       *          *       **       *          * 01 025*
* 030840 **            **01 012 *1 05 01 26*       **       *          *       *
* 030845 **JT G   JT D **
* 030855 **            **       *1 02 13 74*       **       *          *       *
* 030856 **            **03 120 *          *       **       *          *       *
* 030857 **            **02 052 *          *       **       *          *       *
* 030858 **            **01 028 *          *       **       *          *       *
* 030864 **JT G   JT D **01 008 *          *01 017 **01 008 *2 02 00 13* 01 049*
* 030865 **            **       *          *       **       *3 01 13 80*       *
* 030868 **            **       *          *       **       *1 06 07 06*       *
* 030870 **            **01 008 *          *       **       *1 03 08 33*       *
* 030874 **            **       *          *       **       *1 03 02 06*       *
* 030878 **            **02 020 *          *       **       *          *       *
* 030879 **            **02 020 *          *       **       *          *       *
* 030882 **JT G   JT D **       *1 01 06 33*       **       *1 02 01 06* 01 049*
* 030883 **       JT D **
* 030887 **JT G        **02 012 *          *       **       *          *       *
* 030889 **DEFG        **
* 030890 **JT G        **
* 030894 **DEFG        **       *          *       **       *3 01 09 53*       *
* 030895 **            **       *          *       **       *2 02 14 80*       *
* 030896 **            **       *          *       **       *1 11 01 67*       *
* 030897 **JT G   JT D **       *1 01 02 06*       **       *          *       *
* 030900 **            **       *          *       **       *          * 01 037*
* 030907 **            **01 008 *          *       **       *1 02 01 06*       *
* 030914 **JT G   JT D **                                   *          *       *
* 030915 **            **       *          *       **
* 030923 **            **       *          *       **       *1 14 02 80*       *
* 030928 **            **01 016 *          *       **       *1 02 01 06*       *
* 030932 **       JT D **       *          *01 049 **       *          *       *
* 030933 **            **       *1 08 12 26*03 025 **       *1 03 02 06*       *
* 030940 **JT G   JT D **
* 030951 **JT G   JT D **       *          *03 013 **       *          *       *
* 031    **JT G   JT D **       *1 01 13 80*       **       *1 02 01 06*       *
* 031005 **            **       *          *02 017 **       *          *       *
* 031010 **            **01 052 *          *01 021 **       *          * 01 009*
* 031011 **            **       *          *       **       *          * 02 049*
```

Fig. 208. — *Listing établi par l'ordinateur*

point kilométrique de départ, le nom du responsable de l'équipe de contrôle etc. Une série de programmes préenregistrés introduits manuellement par le clavier permet de sélectionner les informations à imprimer en fonction des besoins.

6.5. Tableau de bord

L'ensemble des tiroirs avec leurs commandes et leurs réglages, les informations vidéo et les différentes commandes (verrouillages et contrôle, stockage de l'eau, commande manuelle du chariot, moteurs, alarmes, etc.) sont assemblés modulairement sur une console qui permet un contrôle permanent du bon fonctionnement de l'installation (fig. 209). Les défauts signalés y apparaissent également sur un profil de rail par le moyen de diodes électroluminescentes. Ce tableau est également équipé du clavier qui permet d'assurer la commande et le contrôle de l'ordinateur de bord.

7. Aspect économique du contrôle non destructif

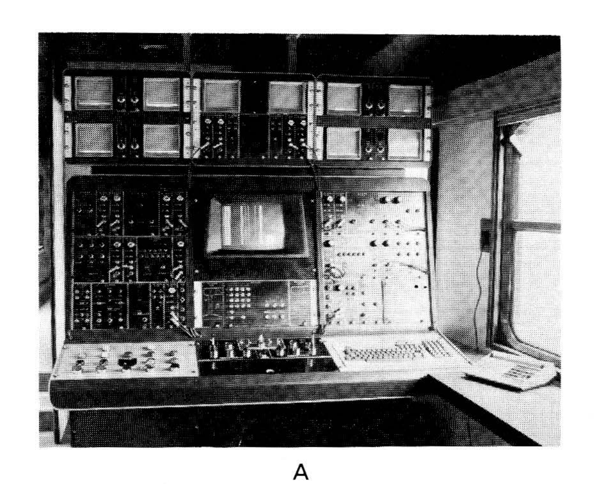
7.1. La seule étude économique significative faite sur le sujet est une modélisation de l'analyse statistique des défauts de rails faites par la SNCF (3) dans laquelle on a utillisé un certain nombre de lois stochastiques portant sur la loi d'apparition des défauts (loi de Weibull), la loi d'évolution de la surface des défauts, la probabilité de rupture en fonction de ladite surface, la loi de répartition de la périodicité des auscultations ($\sigma = 2.5$ MT bruts), la fiabilité de l'appareillage de contrôle en fonction de la surface du défaut. Le modèle a été vérifié par comparaison de ses résultats avec la réalité.

Soit N le nombre annuel de ruptures et retraits pour avaries. Ce nombre, fonction du trafic et de la qualité de fabrication est sensiblement constant (15 000 pour la SNCF). Le pourcentage de ruptures α est par contre largement fonction du type de contrôle utilisé : il varie de 0,05 pour un contrôle ultra-sonore fin à 0.5 ou 0.6 pour un simple contrôle visuel sérieux (particulièrement onéreux) et à la limite à 1 pour une absence totale de contrôle.

Soit K_r le coût de remplacement d'un rail rompu
K_a le coût de remplacement d'un rail avarié

$K_r > K_a$ car un rail avarié peut être remplacé en chantier organisé.

(3) RGCF de juin 1981 : étude statistique de la méthode de contrôle des rails en voie par B. Prasil et R. Moulin.



A



B

Fig. 209 A/B. — *Console de commande et contrôle*

D'autre part le coût K_r doit être multiplié par un facteur compris entre 1 et 3 pour tenir compte des conséquences graves d'une rupture de rail sur les circulations (arrêt ou ralentissement, retard).

Soit K_u le coût kilométrique d'auscultation d'une voiture parcourant L kilomètres par an avec une périodicité de base de 12 millions de tonnes. Si T est la périodicité réelle en millions de tonnes, le coût du contrôle est égal à $K_u.L.\frac{12}{T}$;

le coût total pour le réseau est : $C = C1 + C2 + C3$

$$C = N\alpha K_2 + N(1-\alpha)\, K_a + K_u\, L\, \frac{12}{T}$$

Les figures 210 et 211 rappellent l'évolution du nombre de ruptures en fonction de la périodicité du contrôle et le coût total variable avec le paramètre exploitation. On constate un coût global C minimal entre 10 et 12 M de tonnes pour des voies ayant un trafic élevé ou moyen.

L'annexe 4 développe le calcul sur la base de prix 1984 pour un réseau analogue à la SNCF. Elle fait apparaître une importante rentabilité du sondage, rentabilité qui en outre ne tient compte ni du coût des dérail-

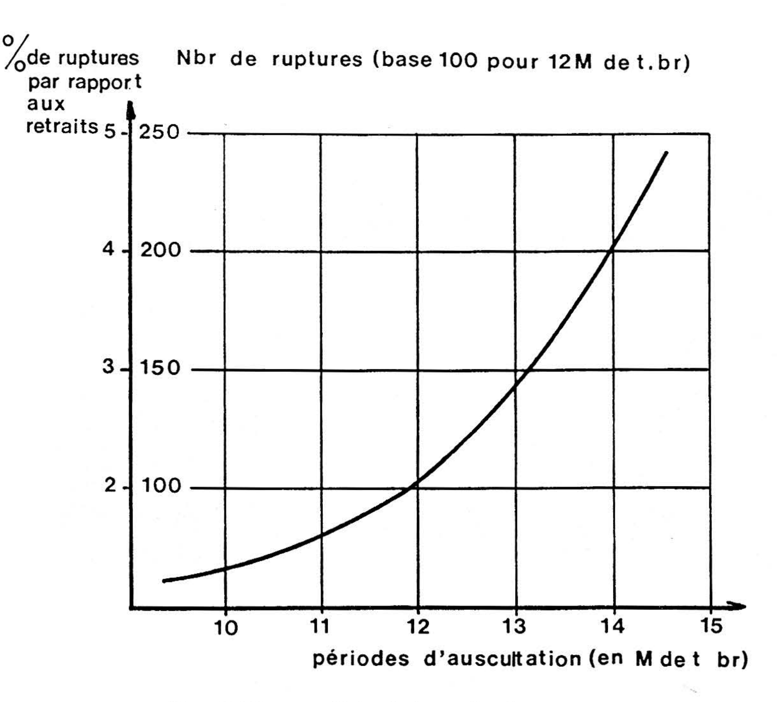


Fig. 210. — *Calcul de coût des ruptures*

lements dont le nombre, nous l'avons vu au chapitre précédent, est fonction des ruptures, ni du coût supplémentaire des tournées dans le cas d'inspections visuelles. Bien que peu précis, ces calculs et les conséquences sur les vies humaines mettent en évidence des ordres de grandeur justifiant la haute rentabilité du contrôle non destructif.

7.2. Coût du contrôle

Compte tenu de l'investissement que représente un véhicule d'auscultation et particulièrement une grosse voiture, il y a un intérêt économique évident à l'utiliser avec le maximum de rendement. Plusieurs facteurs interviennent dans la détermination de ce rendement :

— la vitesse d'auscultation instantanée : nous avons vu que les voitures Matix les plus modernes ont une vitesse d'auscultation comprise entre 40 et 50 km/h, qu'il est actuellement difficile de dépasser sans affecter la fiabilité de détection

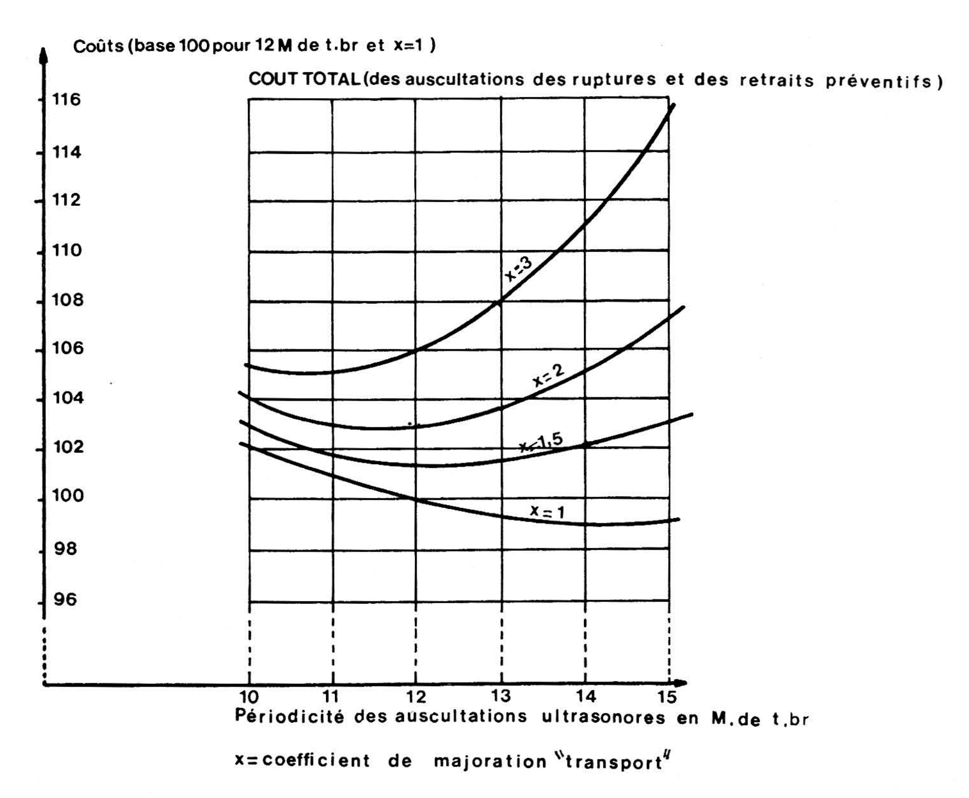


Fig. 211. — *Calcul de coût des ruptures*

— la durée des intervalles mis à disposition par le service du transport : plus ces intervalles sont importants et meilleur est le rendement global, car il faut déduire de chaque intervalle les temps de garage, dégarage et parcours haut-le-pied d'accès à la zone d'auscultation. Il est bon de rappeler à ce sujet que le développement systématique de la mécanisation dans les travaux de la voie (enregistrements voie, rails, signalisation, caténaires, bourrage mécanique, rechargement par soudure à l'arc, meulage de l'usure ondulatoire, etc.) impose de plus en plus des accords à long terme entre les deux services intéressés afin de prévoir sur le graphique de circulation des trains un ou plusieurs intervalles réservés aux travaux de l'équipement, utilisés sur programme et dont le respect se montre très bénéfique pour l'ensemble des intéressés. L'ordre de grandeur le plus satisfaisant de tels intervalles est de deux heures.

— les arrêts inopinés qu'il convient d'éviter à tout prix.
Les voitures d'auscultation magnétique nécessitaient l'arrêt sur défauts pour confirmation électrique ; il en a été de même dans les voitures ultrasonores de type ancien. La fiabilité offerte par les voitures Matix et le classement qu'elles donnent en temps réel de la nature et de l'importance des défauts permet de différer la confirmation de quelques heures ou de quelques jours. Seuls les défauts immédiatement dangereux tels que rupture peuvent justifier un arrêt inopiné ; encore que la mise en place d'une équipe spécialisée reliée par radio permettrait d'éviter tout arrêt de la voiture d'auscultation dans le cas fort rare d'ailleurs où de tels défauts se révéleraient particulièrement nombreux.

Si l'ensemble des conditions ci-dessus est respecté, on peut estimer qu'avec un véhicule d'auscultation travaillant à une vitesse comprise entre 40 et 50 km/h, on obtient une vitesse moyenne, sur une longue période comprise entre 35 et 40 km ; la possibilité qui en découle d'ausculter annuellement entre 15 000 et 20 000 km de voie permet d'obtenir un prix de revient particulièrement avantageux.

L'annexe 5 fait une tentative de calcul de prix de revient 1984. Elle n'a pas d'autre prétention que de montrer l'intérêt d'adapter la dimension des engins à celle des réseaux à ausculter, ainsi que l'influence de la durée des intervalles sur l'abaissement du prix de revient. Il faut bien considérer par exemple qu'un intervalle de 2 heures donnera rarement plus d'une heure de travail effectif, tandis qu'un intervalle de 3 heures donnera en fait 2 heures de travail effectif. 5 000 km paraît être la longueur minimale d'auscultation nécessaire sur un réseau pour rentabiliser l'utilisation d'un véhicule plus ou moins sophistiqué. Au-dessous de ce seuil, une draisine ou une remorque spécialement adaptée est économiquement justifiée, les sondages manuels restant réservés à des zones ou des points particuliers.

8. Conditions d'exécution des contrôles

8.1. La plupart des réseaux européens utilisent à la fois des voitures plus ou moins modernes et des engins portables réservés effectivement à des zones particulières.

La périodicité des contrôles est variable : elle est cependant centrée sur la règle de 12 millions de tonnes que nous avons longuement évoquée, cette règle étant cependant modulée dans certains cas en fonction des vitesses et des charges par essieu. Mais il faut noter que les résultats sont caractérisés par le rapport du nombre de défauts détectés au total des nombres de défauts et des rails cassés en fonction, certes, de la périodicité d'auscultation, mais aussi de la fiabilité de l'appareillage et des conditions d'exploitation des résultats. Ce rapport qui avoisine 99 % avec la voiture V4 de la SNCF peut descendre sur certains réseaux à moins de 90 % d'où un nombre fort coûteux de ruptures.

Notons au passage que la règle de 12 MT ne s'applique pas dès la pose. Un rail neuf moderne ne nécessite aucune auscultation pendant les premiers 50 à 100 millions de tonnes sauf si des défauts visibles ou ruptures se manifestent dans ce délai (4).

8.2. On peut citer trois méthodes différentes d'exploitation des résultats :

— exploitation différée : les résultats, enregistrés sur bande font l'objet d'une analyse en laboratoire. Les résultats sont malheureusement livrés trop tardivement (plusieurs semaines) aux utilisateurs et on observe un nombre relativement important de ruptures. En outre, il est évidemment impossible de contrôler les paramètres en temps réel de l'appareillage et ce système est coûteux en personnel

— exploitation en temps réel complétée par une confirmation ultérieure (en général de 24 à 48 h) sauf pour les défauts dangereux immédiatement contrôlés. Outre l'arrêt de la voiture d'auscultation au droit des défauts dangereux pour examen immédiat, cette méthode est relativement astreignante et coûteuse puisque nécessitant pratiquement un double équipage

---

(4) Les normes AREA prescrivent une auscultation ultra sonore annuelle pour un trafic annuel inférieur à 20 millions de tonnes et 2 au-delà sauf pour les rails élaborés par refroidissement contrôlé qui ne sont inspectés qu'une fois par an jusqu'à un trafic de 40 millions de tonnes. Toutefois si le nombre de défauts dépasse un certain seuil fonction du tonnage annuel, on peut procéder à un contrôle supplémentaire chaque année. Mais ces prescriptions relativement larges concernent essentiellement un trafic marchandise.

— exploitation en temps réel par ordinateur telle que pratiquée par la voiture V4 SNCF-Matix qui donne le maximum d'économies d'exploitation et de sécurité.

8.3. En général, tous les réseaux répartissent les défauts en plusieurs classes :

— défaut dangereux nécessitant un remplacement ou une consolidation sérieuse du rail dans les plus brefs délais et nécessitant un ralentissement des circulations ou même une interruption totale jusqu'à consolidation ou remplacement.

— défauts nécessitant un remplacement du rail dans un délai d'une ou plusieurs semaines en fonction de la gravité et des conditions de consolidation avec parfois possibilité de remplacement en chantier organisé. Le délai de remplacement, variable suivant les réseaux, est fonction de toute une série de facteurs caractéristiques ou parfois locaux. Tout dépassement du délai réglementaire de remplacement peut faire l'objet de mesures de sécurité (ralentissement des circulations).

— défauts ne nécessitant pas de mesures particulières.

8.4. La programmation de circulation des véhicules d'auscultation, élément important de la sécurité ferroviaire doit être établi longtemps à l'avance avec les services du transport qu'il convient de rendre conscients de l'intérêt qu'ils ont à favoriser le passage de ces engins ; ce qu'ils feront d'autant plus volontiers que la vitesse d'auscultation est plus élevée. En effet, répétons-le, le déroulement régulier des programmes, avec des intervalles raisonnables, diminue substantiellement le nombre de ruptures et par conséquent les perturbations à l'improviste toujours particulièrement coûteuses surtout dans les zones et les époques de trafic dense.

ANNEXE 4
RENTABILITÉ DU SONDAGE

$N = 15000$ $K_r = 12\ 000$ F
$\alpha = 0,025$ $K_a = 8\ 000$ F
$L = 20\ 000$ km $K_u = 600$ F
$C_1 = 15000 \times 0.025 \times 12000 = 4,5$ MF
$C_2 = 15000 \times 0.975 \times 8000 = 117$ MF
$C_3 = 600 \times 20000 = 12$ MF
$C = 133.5$ MF
Si $\alpha = 0.5$
$C_1 = 15000 \times 0,5 \times 12000 = 90$ MF
$C_2 = 15000 \times 0,5 \times 8000 = 60$ MF
Coût 150 MF

Si l'on tient compte d'un coefficient moyen égal à 2 pour le coût des perturbations exploitation résultant de ruptures, on doit ajouter 4,5 MF dans le premier cas, 117 MF dans le second d'où des coûts totaux de 137 et 267 MF.

Si $\alpha = 1$
$C = 15000 \times 12000 = 180$ MF, soit 360 MF avec le coefficient exploitation

ANNEXE 5

Coût du contrôle

Le prix kilométrique est donné par la formule

$$\frac{(A + nM)\,k}{J.V.H.}$$

A : amortissement annuel
n : nombre d'hommes nécessaires
M : coût annuel unitaire de main-d'œuvre
K : frais généraux (y compris fournitures et entretien) de l'ordre de grandeur de 2
J : nombre de jours annuels d'utilisation
V : Vitesse d'auscultation en km/h
H : durée utilisable des intervalles journaliers (croissant avec la vitesse de l'engin)

Pour une ligne donnée, par exemple de groupe 3 UIC

1. Utilisation d'un bifile (en MFF)

A = 0,1 n = 2 M = 0,2
J = 240 V = 2 H = 1,5

$$\text{Coût kilométrique } \frac{(0{,}1 + 2 \times 0{,}2)^2}{240 \times 2 \times 1{,}5} \;\#\; 1\,400 \text{ F/km}$$

2. Draisine

$A = 0{,}8 \qquad n = 3 \qquad J = 220 \qquad V = 10 \qquad H = 2$

$$\text{Coût } \frac{(0{,}8 + 3 \times 0{,}2)^2}{220 \times 10 \times 2} \ \# \ 650 \text{ F/km}$$

3. Voiture

$A = 3{,}5 \qquad n = 4 \qquad J = 200 \qquad \text{Coût } \dfrac{(3{,}5 + 4 \times 0{,}2)^2}{200 + 40 \times 2{,}5} = 430 \text{ F/km}$

$V = 40 \qquad H = 2{,}5$

Ces prix qui tiennent compte d'intervalles de travail importants ne sauraient bien entendu revêtir qu'un aspect purement comparatif.

RÉSUMÉ DU CHAPITRE 8

La sécurité du transport ferroviaire exige que toutes les avaries de rails susceptibles de dégénérer en ruptures soient détectées en temps utile. Si certaines sont visibles, d'autres et en particulier les fissurations transversales du champignon ne peuvent relever que d'un contrôle interne non destructif.

Depuis le début des années 60, les procédés de détection électriques et électro-magnétiques, peu précis et lourds d'exploitation ont fait place au contrôle par ultrasons. Ce procédé repose sur la réflexion de tout ou partie d'un faisceau d'ondes ultrasonores par tout changement de milieu traversé et par toute discontinuité, en particulier les fissurations dans le métal ; on procède à la détection soit par transmission, soit par réflexion. Les fréquences choisies et les puissances d'émission doivent tenir compte des caractéristiques des milieux traversés et l'axe d'émission de l'inclinaison dans le rail des avaries à détecter. Les défauts de surface sont reconnaissables grâce aux courants de Foucault.

Il existe toute une gamme d'engins d'auscultation caractérisés par le nombre de sondes, le niveau de motorisation, la vitesse d'auscultation et les conditions de repérage et marquage des défauts.

En bas de gamme, l'appareil Minix, portable est équipé de sondes 0° et 70° ; il permet la confirmation sur place par du personnel non spécialiste. Les cannes monorails et les systèmes bifiles peuvent être complétés par des écrans vidéo. On trouve ensuite les draisines, remorques de draisines et les autorails légers pouvant d'ailleurs être com-

binés avec d'autres fonctions d'enregistrement et permettant une auscultation à la vitesse de 15 à 20 km/h, l'enregistrement se faisant sur papier. Tous ces véhicules conviennent parfaitement à des réseaux dont les besoins sont de quelques centaines voire quelques milliers de kilomètres par an.

Au-delà (auscultation de 10 000 à 25 000 km annuels) on aborde le domaine des véhicules automoteurs spécialisés dont la vitesse d'exploitation est comprise entre 40 et 50 km/h. C'est le cas des véhicules V4 SNCF et 505 MATIX qui transportent un volume de liquide de couplage (4 tonnes d'eau) suffisant pour assurer une large autonomie. Les porte-sondes sont accrochés à un chariot équipé de plusieurs manœuvres automatiques. Les émissions ultrasonores et les données recueillies à partir des sondes sont traitées dans des tiroirs modulaires et les échos recueillis affichés sur des écrans vidéo. L'enregistrement est réalisé sur bandes graphiques ou mieux les données sont traitées par ordinateur programmé en conséquence et qui se substitue à l'homme pour interpréter d'où une meilleure fiabilité. L'enregistrement automatique ou manuel de points caractéristiques de la voie et le marquage automatique à la peinture des défauts détectés sur le rail permettent une intervention précise et rapide des responsables de la maintenance de la superstructure. Tous les résultats font l'objet d'un listing complété par toute statistique nécessaire.

Les études économiques qui ont été menées mettent en évidence une périodicité d'auscultation de l'ordre de 10 millions de tonnes brutes de trafic ; il y a en outre un intérêt majeur à bénéficier d'intervalles de circulation sur les voies aussi larges que possible, compte tenu du coût élevé d'amortissement des véhicules lourds d'auscultation.

9 L'USURE ONDULATOIRE

1. Description

1.1. Parmi les défauts chroniques des rails, nous avons évoqué, dans le chapitre consacré aux avaries, l'usure ondulatoire. Ce défaut, très spécifique par son aspect, son évolution non susceptible de rupture, ses conséquences sur la superstructure et le matériel roulant, ses incidences économiques et, enfin, son mode spécifique de traitement, mérite un développement particulier.

L'usure ondulatoire (1) présente une série de particularités qu'il est intéressant de mentionner a priori :

— Elle se présente sous forme d'''ondulations'', de caractère périodique ou pseudopériodique, accompagnées de modifications de la structure métallurgique de la zone affectée par le défaut.

— Malgré le nombre considérable d'études et le volume imposant de recherches effectuées sur le sujet, aucune explication convaincante n'en a encore été apportée ; on peut cependant affirmer que certains phénomènes de résonance entre le rail et les roues qu'il supporte sont à l'origine de l'usure ondulatoire. Mais, l'influence des divers paramètres en jeu (constitution de la voie,

(1) Désignée souvent par u.o. dans la suite du texte.

caractéristiques du rail, type et vitesse du trafic...) n'a pu être mis en évidence, tout au moins de façon certaine.

— Il en résulte qu'aucune mesure spécifique pour supprimer l'apparition et le développement du phénomène, ou tout au moins le retarder, n'a pu être prise ; or, si l'usure ondulatoire ne présente aucun caractère de gravité au point de vue de la sécurité, elle peut influencer défavorablement l'adhérence et elle entraîne de grosses dépenses pour les réseaux qui en sont affectés.

En l'absence de moyens préventifs, le seul procédé curatif efficace consiste à meuler les rails en voie avant qu'il ne soit trop tard, ce qui permet de réaliser de substantielles économies globales, non seulement sur la maintenance de la voie, mais aussi sur celle du matériel moteur et roulant.

— Enfin, l'usure ondulatoire, en se développant, occasionne très rapidement des nuisances graves sur l'environnement, sans omettre l'incidence sur le confort acoustique des voyageurs ; or, ce double problème prend aujourd'hui une importance croissante.

1.2. L'usure ondulatoire revêt les mêmes aspects sur la totalité des réseaux ferroviaires, certains d'entre eux étant toutefois plus ou moins marqués suivant les caractéristiques particulières des lignes intéressées. C'est ainsi que les voies de métro et de tramways, ainsi que les réseaux miniers à forte charge par essieu, sont particulièrement affectés par les usures moyennes et longues, tandis que les réseaux classiques doivent lutter contre l'usure courte. Dans l'ensemble, les lignes parcourues par des circulations identiques et à essieux moteurs nombreux, apparaissent comme les plus affectées.

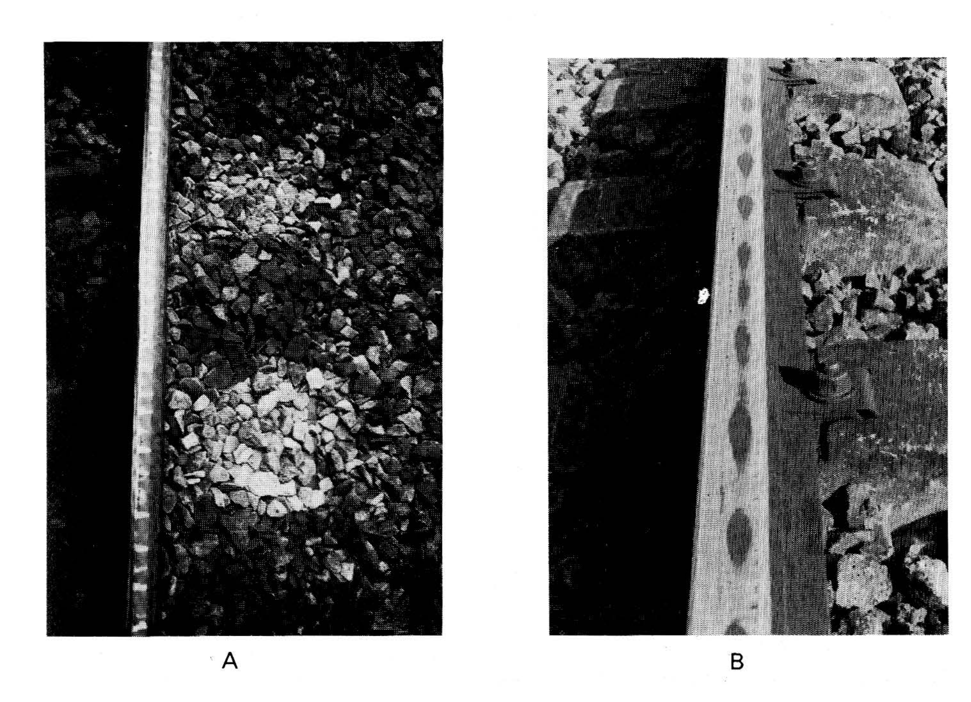
L'analyse de la littérature technique montre que ce phénomène désagréable préoccupe les chemins de fer depuis longtemps : Tramways de CINCINNATI en 1895 (2), Tramways de BIRMINGHAM et d'EDIMBOURG en 1913 (Sellon), de LONDRES en 1922. Les grands réseaux s'y sont ensuite intéressés : FRANCE et ITALIE en 1920 et 1930, et surtout l'ALLEMAGNE à partir de 1950 : 46 % du réseau de la DB en aurait été affecté en 1954 ; bien entendu, l'UIC et l'ORE se sont penchées sur la question, mais sans conclusions définitives. En par-

(2) BALDWIN mentionne l'apparition d'ondes dans une courbe de 30 m de rayon.

ticulier, le Congrès de MADRID de l'AICCF (DELGADO) a fait le point en 1958.

1.3. L'usure ondulatoire revêt différentes formes, mais caractéristiques de phénomènes différents. On en distingue trois types fondamentaux :

a) l'usure ondulatoire à ondes courtes (corrugation). Certains rails présentent sur leur bande de roulement une succession de plages polies qui se détachent sur un fond plus mat (fig. 212) ; la forme de ces taches présente des aspects très variés (fig. 213) : ellipses, cercles, crochets, bandes pseudo-continues, etc...



A B

Fig. 212 A/B. — *Usure ondulatoire courte*

La distance entre les taches brillantes varie de 3 à 8 cm ; elles sont le plus souvent assez régulièrement espacées avec cependant des zones nettement plus marquées à intervalles d'une trentaine de centimètres, ce qui correspond à une sorte de modulation à plus basse

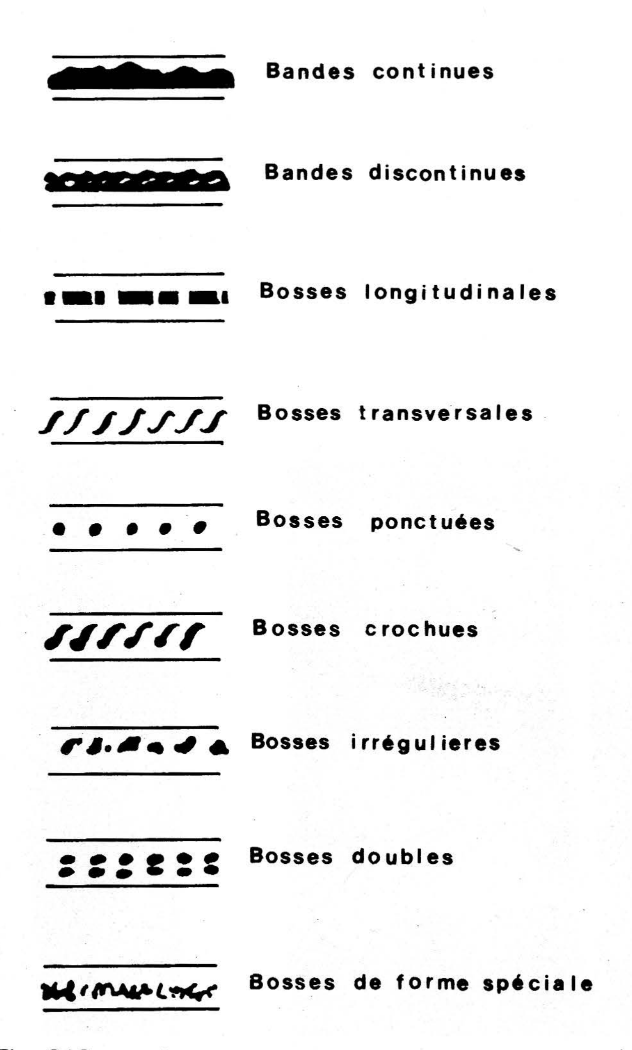


Fig. 213. — *Aspects divers de l'uo courte*

fréquence. Les rails présentant ce défaut sont donc affectés d'ondulations dont les crêtes et les creux occupent une position bien déterminée, ces derniers ayant une profondeur variant de quelques centièmes à quelques dixièmes de millimètres. Lorsque les usures cour-

tes et longues se superposent, l'usure courte est en général plus marquée dans les creux des défauts longs où l'adhérence des roues est plus faible.

Ce type d'usure affecte indifféremment l'une ou l'autre des deux files de rails, ou bien les deux simultanément ; sur chaque file, certains rails, ou certaines zones, sont atteints, sans que l'on puisse établir une corrélation entre le phénomène et certaines des caractéristiques du rail ou de la superstructure.

Les parties brillantes, en relief, correspondent sensiblement aux sommets des crêtes ; les parties sombres, en creux, sont oxydées. Les analyses micrographiques permettent de déceler dans les bosses une structure martensitique de trempe sur une profondeur très faible (de quelques centièmes de millimètres à 0,2 ou 0,3 mm). La résistance de ces zones varie de 150 à 200 daN/mm² et la dureté superficielle peut atteindre et même dépasser 500 HV. Cette structure s'explique par le glissement des bandages sur le rail qui engendre une forte élévation de température (Θ supérieure à Ac 3), suivie d'un refroidissement brutal par la masse du rail. La martensite occupant un volume supérieur à celui des structures en équilibre (cf. chap. IV), on explique ainsi la formation des bosses. La figure 214, montre l'efficacité d'un meulage sur la suppression de cette couche, par mesure de la dureté VICKERS.

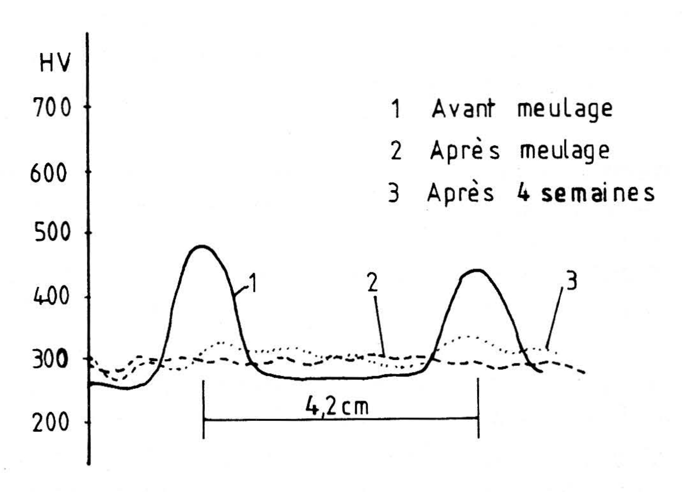


Fig. 214. — *Dureté VICKERS sur uo*

Dès sa naissance, l'UO engendre au passage des véhicules un bruit caractéristique semblable à l'émission d'une onde musicale : c'est pourquoi ces rails sont appelés ''rails chantants'' ; c'est par ce bruit que l'on peut déceler les premières manifestations de l'UO, car, à ce stade, elle n'est pas encore visible. Ultérieurement, le bruit s'accentue progressivement jusqu'à devenir insupportable, au fur et à mesure de l'augmentation de la profondeur de l'onde.

b) *Usure ondulatoire moyenne (short waves), dans les courbes de faible rayon*

Sa longueur d'onde est comprise entre 15 et 30 cm, et sa profondeur moyenne est de l'ordre de 0,3 mm. Elle n'apparaît généralement que dans des courbes de rayon inférieur à 150 m, et le plus souvent sur le rail bas. La conicité des bandages ne pouvant pas compenser systématiquement la différence de développement des deux files de rails, il se produit des déformations élastiques soit de l'essieu (torsion), soit dans les liaisons longitudinales entre l'essieu et le châssis de bogie ou de caisse. Lorsque les efforts ainsi générés au niveau du contact rail-roue deviennent supérieurs à l'adhérence de la roue la moins chargée, il en résulte une relaxation de l'essieu ; le phénomène se reproduit périodiquement avec des fréquences pouvant atteindre quelques centaines de Hertz.

c) *Usure à ondes longues (long waves)*

Cette usure, qui peut varier de 0,60 et surtout de 1,50 m à 2 m de longueur d'onde, avec 0,5 mm de profondeur moyenne, qu'il est difficile de ramener en-dessous de 0,3 mm, provient, semble-t-il, d'une aggravation de défauts préexistants dans le rail et, en particulier, des déformations périodiques imprimées par les galets des machines dresseuses à la fin de la chaîne de fabrication des rails (périodicité de 1,60 à 1,70 m).

Contrairement à ce qu'on remarque avec l'usure à petites ondes, on ne trouve pas en général, dans ce type d'usure, de couche autotrempée sur les crêtes, mais une structure de ferrite-perlite écrouie. On peut en outre observer parfois des écoulements de métal. On a fait les observations suivantes sur les lignes électrifiées de la banlieue parisienne :

— la pseudo-période de l'usure ondulatoire varie sur la longueur de la barre. Elle est comprise entre 0,60 m et 1 m, exceptionnellement entre 0,45 m et 1,50 m. Elle ne coïncide pratiquement pas avec l'écartement entre les traverses ; d'ailleurs, les ondulations subsistent sur les longrines des tabliers métalliques.

La concordance des ondulations sur les deux files reste relativement rare.

— l'amplitude, qui atteint couramment 2 mm, et exceptionnellement 5 mm, varie sur la longueur de la barre, sans corrélation avec la longueur de l'onde.

Si les longueurs d'ondes des divers types respectent rigoureusement les fourchettes mentionnées, les profondeurs ne sont données qu'à titre indicatif et varient suivant le degré de développement du phénomène. Elles ne font qu'en schématiser l'aspect général.

Il faut en outre noter que chacun des trois types offre un aspect caractéristique sur lequel nous allons revenir, les origines des phénomènes apparaissant également comme très liées à leur nature.

Enfin, il n'est pas sans intérêt de noter que l'on trouve dans la nature et dans la technique un certain nombre de phénomènes d'aspect tout à fait analogue à celui de l'usure ondulatoire des rails et pour lesquelles des explications pas toujours convaincantes, mais le plus souvent basées sur des phénomènes de résonance, ont été données. Dans cet ordre d'idées, on peut citer le phénomène dit de "tôle ondulée" constaté sur les routes en terre (latérite), la formation des dunes, les "rides" qui apparaissent sur le sable à marée basse et, bien sûr, l'usure ondulatoire parfois observée sur les bandages des engins de traction, et plus particulièrement des locomotives électriques.

1.4 Le spectre d'excitation du système

L'usure ondulatoire apparaît nettement sur les spectres de défauts de la voie. A cet effet, la SNCF a mis au point des dispositifs de mesure permettant d'explorer les défauts de façon continue entre 5 mètres et 3 centimètres de longueur d'onde. Les spectres de défauts de nivellement ainsi mesurés présentent (fig. 9 et 10)

— d'une part, un fond continu, représenté en coordonnées logarithmiques par une droite de pente — 3, jusqu'à des longueurs d'onde de quelques cm.

Une opération de meulage modifie peu l'allure du spectre jusqu'à 2 m, mais au-dessous la pente devient beaucoup plus grande, de l'ordre de — 7.

— d'autre part, un spectre de raies très caractéristiques :

- l'une aux environs de 1,70 m due aux défauts de dressage du rail en sortie d'usine,
- l'autre, aux environs de 6 cm, qui correspond à l'usure ondulatoire courte classique, une intermodulation existant entre les défauts de 1,70 et 0,06 mètre.

Le défaut de 1,70 m, dont la profondeur peut atteindre 0,6 mm, mais qui est maîtrisable par meulage à meules bloquées sur châssis de 2,50 m environ, est à l'origine de très gros efforts dynamiques dommageables pour le matériel de voie, le matériel roulant et semble surtout responsable d'une attrition rapide du ballast.

Sur ces spectres, on distingue plusieurs éléments intéressants.

Tout d'abord, des bandes assez larges (du fait de la rupture de phase à chaque rail élémentaire) correspondant à l'excitation de 1,70 m dont la fréquence centrale augmente avec la vitesse.

L'énergie contenue dans ces bandes croît comme la puissance 4,75 de la vitesse, l'amplitude de la surcharge correspondante croissant donc un peu plus vite que le carré de la vitesse.

Par contre, l'aire totale du spectre qui représente le carré de la valeur efficace de l'effort total croît comme la puissance 2,28 de la vitesse. La moyenne quadratique croît, de son côté, sensiblement comme la vitesse, confirmant ainsi la formule théorique du chapitre II qui représente finalement assez bien la réalité.

La part relative de la bande de 1,70 m dans l'aire totale du spectre croît avec la vitesse, de 2,2 % à 100 km/h, jusqu'à 38 % à 310 km/h. Cela explique qu'il est indispensable de maîtriser ce défaut aux grandes vitesses, alors qu'il est peu gênant jusqu'à 200 km/h.

On constate également sur ces spectres un peigne de Dirac dont les raies sont espacées en Hertz de V/18 m (V : vitesse) et qui résultent des défauts de soudure. L'énergie contenue dans ces raies est faible, mais intervient en ce qui concerne le bruit et le confort.

L'usure ondulatoire courte qui se traduit par un ensemble de raies centrées autour de 6 cm intervient, nous l'avons vu, sur la fatigue des attaches, sur le bruit et, au même titre que le défaut de 1,70 m sur l'usure du ballast.

2. Les effets de l'u.o.

2.1. L'u.o. engendre, au passage des circulations, des vibrations tant dans l'infrastructure et la superstructure de la voie ferrée que dans la totalité du matériel roulant (caisses et masses non suspendues). On a mesuré des niveaux d'accélération du rail respectivement 100 g et 10 g suivant qu'il est ou non affecté d'usure ondulatoire. Par contre, un meulage d'u.o. a permis de réduire de 5 à 0,8 g l'accélération dans une caisse de voiture, et de 2,7 à 1, 1 g dans une caisse de locomotive, à la fréquence correspondant à l'u.o. La longueur d'onde et la vitesse des convois déterminent la fréquence excitatrice, la profondeur des ondes fixe le niveau des efforts et des accélérations. V étant la vitesses exprimée en km/h et l la longueur d'onde en mètres, la fréquence F est donnée par la formule

$$F(hz) = 0.28 \times V/l$$

Cette formule est représentée graphiquement par la figure 215.

On peut alors observer des phénomènes de résonance avec la fréquence de vibration propre de certains éléments composants de la voie ; par exemple, l'expérience a montré l'intérêt d'une fréquence de vibration des bourroirs des machines automatiques d'environ 35 Hz ; la mise en œuvre d'une telle fréquence en dehors du traitement par bourrage ne peut que conduire à une déstabilisation des moules supports des traverses.

En reprenant la formule précédente, ou le graphique qui l'explicite, on constate, à titre d'exemple, qu'un train circulant à 30 km/h sur une u.o. de 20 cm, engendre des vibrations à 40 Hz ; de même, pour V = 140 km/h et l = 1 m ; mais, nous l'avons signalé, l'amplitude de l'onde longue est sensiblement supérieure à celle de l'onde courte ; dans le second cas, les efforts seront donc plus importants, tout au moins à égalité de charge dynamique par essieu. La nocivité des ondes longues croît avec la vitesse.

2.2. Les surcharges dynamiques dues à la présence d'u.o. résultent essentiellement des masses non suspendues du fait de la filtration des vibrations par les ressorts des masses suspendues aux fréquences intéressées. En supposant le défaut comme purement sinusoï-

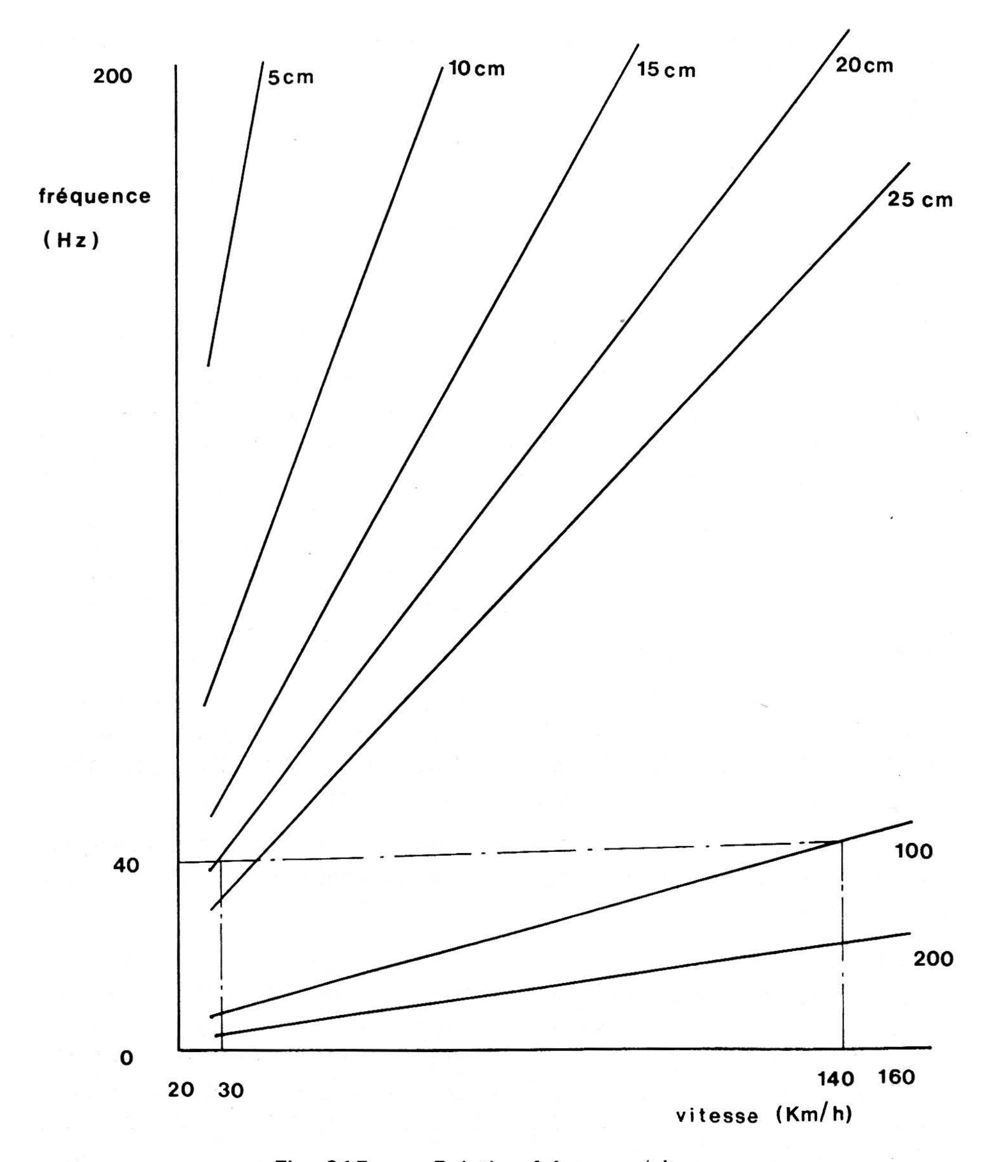


Fig. 215. — *Relation fréquence/vitesse*

dal, ce qui se justifie par la possibilité de décomposer tout défaut périodique en série de FOURIER, le système peut être modélisé par une roue dotée d'une certaine élasticité, roulant sur une voie de profil sinusoïdal, dotée d'élasticité et d'amortissement. Le cas de l'u.o. longue peut se traiter en supposant la roue infiniment rigide. L'équation du

mouvement s'écrit, si l'on ne considère que les surcharges dynamiques :

$$m \frac{d^2z}{dt^2} + r \frac{d(z - \eta)}{dt} + h(z - \eta) = 0$$

m = masse non suspendue de la roue
h et r = élasticité et viscance du système
z et η = ordonnées du centre de roue et du défaut.

La solution de cette équation par transformation de FOURIER montre que la surcharge dynamique croît avec la vitesse, passe par un maximum, puis se stabilise (fig. 216). Le déphasage croît de 0 à 180°. On aboutit à des surcharges, effectivement mesurées en voie, de l'ordre de grandeur des charges statiques, dans la gamme des très grandes vitesses, ce qui justifie, pour le TGV, à la fois un dressage en usine particulièrement soigné, et un meulage préventif en voie. Le calcul montre en outre que les surcharges croissent avec la masse non suspendue et qu'une voie souple est favorable lorsque la longueur d'onde des défauts diminue.

Dans le cas de l'u.o. courte, le lissage des efforts dû à la surface de contact rail-roue limite leur action au rail dans la zone de la surface de roulement. L'élasticité des éléments au contact intervient donc dans l'équation et la complique sensiblement.

Des mesures effectuées sur la SNCF, sur de l'u.o. de 6 cm, il ressortait les surcharges dynamiques suivantes :

1 T 1 à 280 Hz
2.6 T à 650 Hz
4.1 T à 825 Hz

Un modèle établi en Grande-Bretagne (GRASSIE), basé sur une élasticité globale de la zone de contact rail-roue donne l'évolution de la surcharge dynamique en fonction de la fréquence de l'excitation. La fig. 217 représente l'évolution du rapport $P/k\triangle$, P étant la surcharge dynamique de contact, k le coefficient de rigidité rail-roue et $\triangle$ l'amplitude de l'u.o. Ce graphique montre en particulier l'importante influence de l'élasticité des semelles utilisées. On constate que les surcharges croissent rapidement à partir de fréquences comprises entre 500 et 1 500 Hz, ce qui, pour une longueur d'onde de 6 cm, correspond à des vitesses variant de 100 à 300 km/h. Pour une fréquence de 1 000 Hz, en admettant une rigidité roue-rail de 100 tonnes par mm, on obtient, pour une profondeur d'u.o. de 0,1 mm, une valeur de surcharge comprise entre 5 et 10 t, résultat compatible avec les mesu-

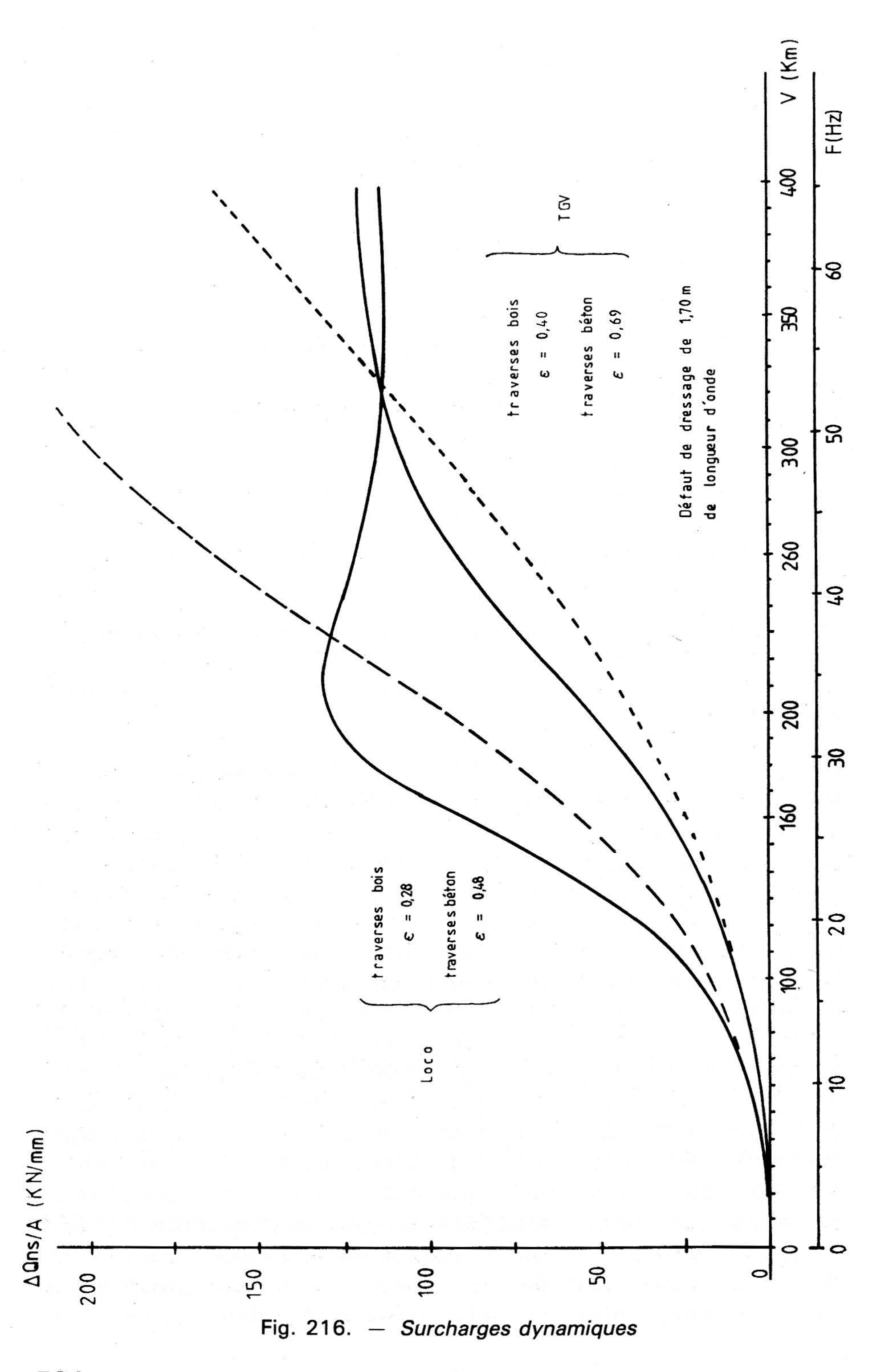
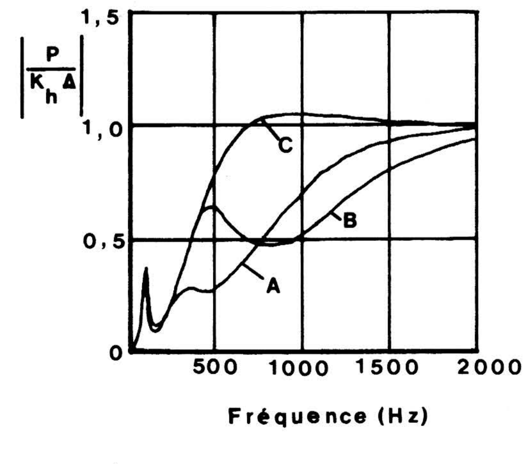


Fig. 216. — *Surcharges dynamiques*



Raideur de semelle
- A = 0,2 GN/m
- B = 1 GN/m
- C = rigide

Fig. 217. — *Évolution des surcharges dynamiques avec la fréquence*

res SNCF. On constate enfin que la surcharge varie proportionnellement à la profondeur de l'u.o., mais ce résultat est à tempérer par le fait que la longueur d'onde a tendance à augmenter avec la profondeur, ces deux paramètres étant évidemment liés au diamètre des roues qui ne leur permet de s'inscrire que dans une corde de longueur limitée : théoriquement, 0,05 mm pour une u.o. de 6 cm de longueur d'onde, et une roue de 900 mm de diamètre.

Il faut enfin noter que les surcharges dynamiques qui prennent naissance du fait de l'u.o. dans la zone de contact rail-roue s'amortissent rapidement dans les semelles et la traverse qui jouent le rôle de filtre ; il en résulte que ces efforts sont beaucoup plus nocifs pour les rails et les attaches qu'ils peuvent détruire rapidement que pour la tenue du nivellement.

Une étude sur modèle de l'AREA, confirmée par des mesures en voie et qui, d'après les profondeurs mentionnées, concerne l'usure longue, met en évidence un doublement des charges statiques, dans certains cas extrêmes (fig. 218), dû à l'usure ondulatoire.

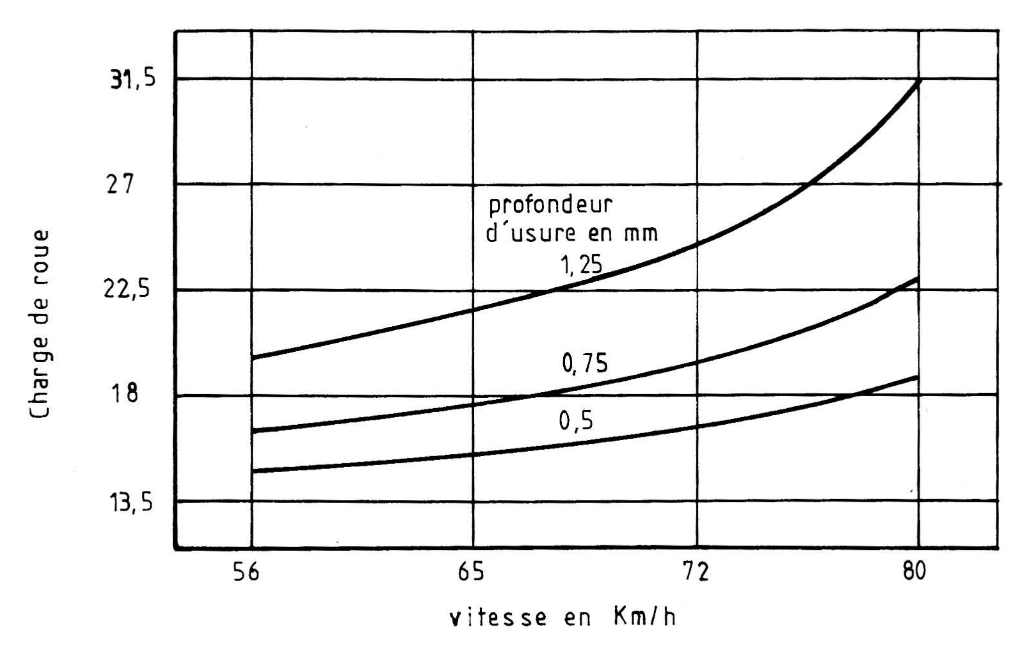


Fig. 218. — *Étude AREA sur l'uo*

L'u.o. courte ou longue entraîne donc dans la voie des efforts dynamiques très importants dont les effets néfastes, soit sur le matériel, soit sur la géométrie de la voie, soit sur les deux, sont liés à la vitesse des trains, à la longueur d'onde et à la profondeur de l'u.o. et, enfin, aux élasticités globales des masses non suspendues.

2.3. En outre, l'u.o. cause, par les vibrations à haute fréquence qu'elle entraîne, d'importantes nuisances acoustiques (3) ; grâce à des mesures effectuées à l'aide d'un véhicule d'enregistrement ad hoc, la SNCF a mesuré, à la vitesse de 140 km/h, une réduction après meulage d'environ 10 dB du niveau d'accélération sur les boîtes d'essieux, en particulier pour les fréquences supérieures à 80 Hz, et de 5 à 7 dB du niveau général de bruit sous un bogie dans la gamme de 500 à 2 000 Hz. La DB a constaté une différence de 5 à 15 dB à 25 m d'une voie, suivant qu'il y a, ou non, de l'u.o., ce qui est con-

(3) Les problèmes de bruit sont explicités dans l'annexe 6.

sidérable. Dans cet esprit, la fig. 219 illustre le gain apporté de ce point de vue par le meulage. Il ne faut pas oublier que le niveau de sensation auditive de l'oreille humaine varie avec la fréquence excitatrice. La figure 220 montre l'intérêt d'une diminution du niveau de bruit dans la fourchette de 50 à 10 000 Hz.

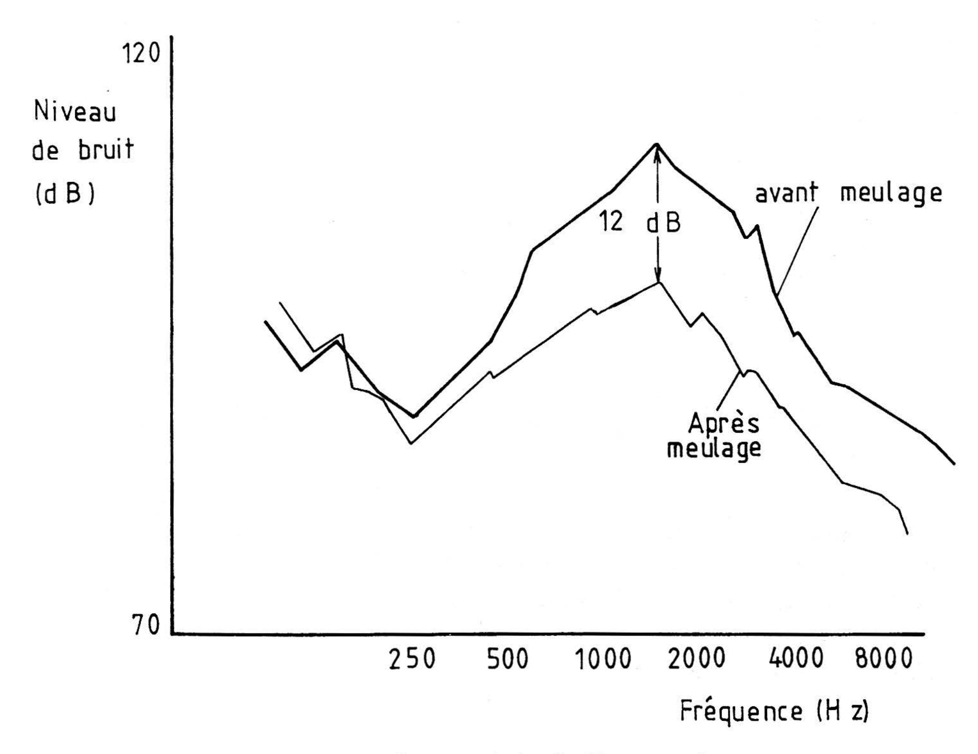


Fig. 219. — *Gain sur le bruit dû au meulage*

Si les ondes de courte longueur d'onde ont une action non négligeable sur le niveau de bruit, elles sont particulièrement néfastes par la dissipation considérable d'énergie qu'elles entraînent dans la voie et le matéreil roulant, des accélérations supérieures à 50 g ayant été constatées, alors qu'elles ne dépassent pas quelques g en l'absence d'u.o.

De ceci résultent d'importantes détériorations dans les éléments constitutifs de la voie : desserrage des attaches, détérioration des trous

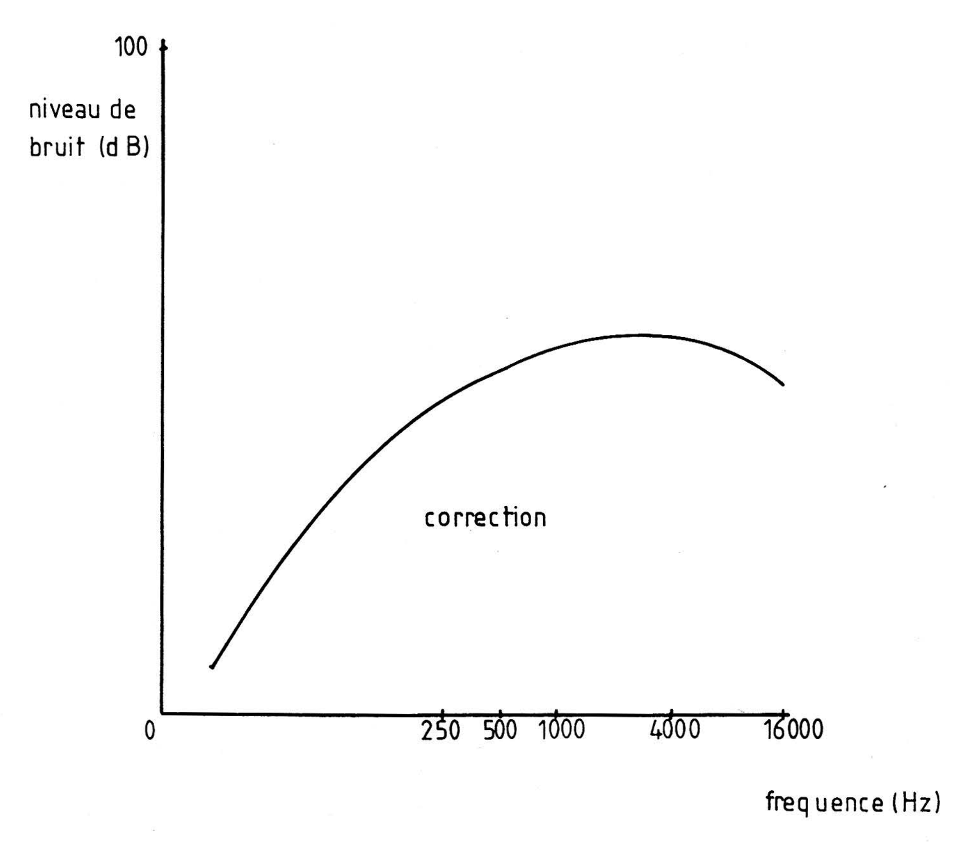


Fig. 220. — *Relation entre bruit et fréquence*

de fixation, affaiblissement des joints, détérioration des traverses, attaches et semelles, développement plus rapide des défauts de fatigue des rails. Sur les lignes à très grande vitesse (type TGV), les ondes longues, le plus souvent inapparentes, produisent les mêmes effets de sorte qu'un meulage préventif sur de telles lignes est un gage certain de substantielles économies de maintenance pour l'avenir.

En dehors de la détection de l'u.o. par les véhicules de mesure spécialisés, décrits ultérieurement, celle-ci se manifeste souvent sur les graphiques des voitures d'enregistrement de la géométrie de la voie par un empâtement du trait correspondant aux vibrations des styles dues aux ondulations du rail. Ce phénomène traduit bien les efforts auxquels l'u.o. soumet les véhicules.

2.4. Consommation d'énergie

L'effet de l'u.o. sur la consommation d'énergie est évidente, bien que très difficile à appréhender ; les seules études connues sont américaines et concernent des ondes moyennes (300 mm), avec des creux extrêmement prononcés. Des profondeurs de l'ordre de 0,8 à 1 mm entraînent une consommation d'énergie supplémentaire de l'ordre de 2 à 3 wh/tk (fig. 221).

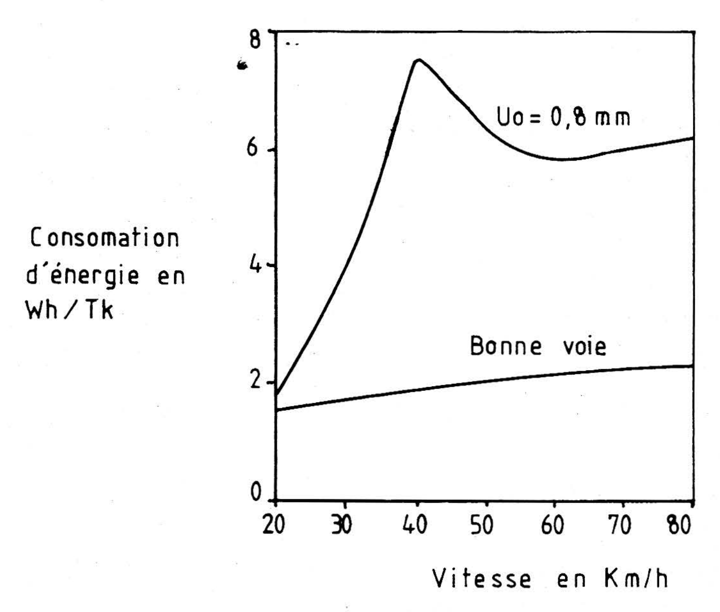


Fig. 221. — *Incidence de l'uo sur la consommation d'énergie*

La perte d'énergie atteint son maximum pour une fréquence de 40 Hz et reste ensuite constante si la fréquence excitatrice augmente. La fréquence de 40 Hz correspond à un défaut de 300 mm de longueur d'onde à la vitesse de 43 km/h. Au-dessus de cette limite de 40 Hz, l'absorption d'énergie pour un défaut de 300 mm de longueur d'onde et une profondeur de 0,5 mm est d'environ 0,7 wh/tkm, tandis qu'elle est environ 10 fois plus grande pour une profondeur de 2 mm. Dans d'autres études, on a constaté, pour des ondes de 0,8 mm de profondeur, une absorption d'énergie de 2 à 3 wh/tkm et une valeur double pour une profondeur de 1,3 mm. Pour chaque million de tkm de trafic, circulant sur une voie affectée d'u.o. de

1,3 mm de profondeur, les dépenses d'énergie supplémentaires sont de l'ordre de 120 à 200 US$.

Mount Newman cite 0,3 litre de carburant économisé par tonne transportée à 425 km, ce qui donne un ordre de grandeur de 3,5 wh/tk.

3. Origine de l'u.o.

3.1. L'analyse des divers facteurs susceptibles d'agir sur l'apparition de l'usure ondulatoire ne permet de tirer que des conclusions partielles sur ses origines.

a) Facteurs dépendant du matériel roulant :

— l'homogénéité du trafic.

La régularité des vitesses de circulation, principalement sur les lignes électrifiées, apparaît comme un facteur favorable à l'apparition d'une usure ondulatoire intense. Néanmoins, les lignes à trafic homogène sont relativement rares (métro, TGV, lignes minières).

— la nocivité propre des essieux-moteurs.

Les cas d'usure ondulatoire intense seraient attribués à l'action des essieux moteurs, dans la mesure où leur masse et leur puissance motrice seraient plus élevées.

Le mode d'entraînement de ces essieux, leur couplage et leur fréquence propre de torsion, jouent certainement un rôle important, de même que l'u.o. existant sur les bandages.

b) Facteurs dépendant de la voie :

— la formation d'une usure ondulatoire sur un rail neuf peut être favorisée par les facteurs suivants :

— les joints qui provoquent des chocs importants au passage des essieux,

— l'intensité de la flexion élastique du rail entre les traverses,

— la constance de l'espacement des traverses dans le cas d'une usure ondulatoire dont la longueur d'onde est voisine de cet espacement,

- un faible amortissement des oscillations verticales des essieux de la voie,
- Dans certaines voies à fixation médiocre (crampons), le surécartement en courbe au passage des trains. Par contre, le type de fixation est sans effet notable.

3.2. Les essais et études détaillés effectués sur la DB vers les années 60 ont abouti aux conclusions générales suivantes :

- Les rails Thomas et Bessemer seraient plus favorables à la formation de l'u.o. que les rails Martin et à l'oxygène, ce qui est maintenant de peu d'importance, puisque les procédés anciens ont disparu. Par contre, de faibles tensions internes semblent limiter le développement de l'u.o.

La composition chimique et la dureté du rail influent certainement, mais aucune conclusion nette n'a été mise en évidence. Il semble cependant que les rails durs, et en particulier les rails traités thermiquement, soient plus sensibles au phénomène.

- Les profils lourds y sont plus sensibles.
- Le travelage est sans effet, de même que le type de traverse.
- Une assise rigide serait défavorable et une voie souple meilleure du point de vue u.o.
- La traction électrique serait défavorable ; mais, comme elle est liée au développement du trafic, il paraît difficile de conclure. Or, le trafic, ce qui est une banalité, favorise l'u.o.

On voit que ces constatations ne permettent pas d'espérer une amélioration (sauf en ce qui concerne le dressage en usine pour l'usure longue) par une action sur le choix et la fabrication du rail. La pose de rails dressés par traction permettra toutefois d'apprécier l'influence des contraintes internes.

3.3. Développement de l'u.o.

Une étude effectuée il y a quelques années par la DB a permis de représenter le développement de l'usure courte par une loi empirique de la forme suivante :

$$y = CT^{2/3}$$

y = profondeur en mm de l'u.o.
T = tonnage supporté en millions de tonnes brutes de trafic.

Le coefficient C varie de 0,0048 à 0,0073, essentiellement suivant la nature de l'acier à rail. Une autre étude, américaine cette fois, effectuée par l'AREA, est infiniment plus pessimiste puisque, avec les mêmes notations, elle prévoit :

$$y = 0{,}0005\ T^2$$

La formule allemande nous paraît mieux refléter que l'autre le développement de l'u.o. Il faut toutefois tenir compte du fait que la formule américaine concerne des masses par essieu sensiblement plus élevées, et qu'elle paraît concerner l'usure moyenne en courbe, plutôt que l'u.o. courte.

3.4. Explications théoriques

3.4.1. On trouve dans la littérature technique, depuis près d'un siècle, des dizaines, sinon des centaines, de tentatives d'explications de la formation et du développement de l'u.o., mais dont aucune n'emporte l'adhésion, quel que soit le type de phénomène d'usure considéré ; il est infiniment probable que chacune d'elles comporte une part plus ou moins grande de vérité et que cette usure peut en définitive trouver son explication globale dans un amalgame soigneusement dosé d'explications partielles.

On a d'abord donné un certain nombre d'explications qui relèvent uniquement de la fabrication du rail, et en particulier du laminage et du dressage : variations de pression exercées sur le bloom dans les cannelures du laminoir, contraintes internes, températures de laminage, patinage sur les rouleaux de la dresseuse, forme des zones de ségrégation, ect. Ces explications paraissent très insuffisantes en elles-mêmes ; elles peuvent tout au plus justifier le fait que certains rails soient affectés d'u.o., et d'autres pas. A cet égard, cependant, il est certain que le dressage doit jouer un rôle important, non seulement pour l'usure d'1,70 m, ce qui est évident, mais aussi pour les autres types d'usure ; la pose de rails dressés en usine par traction sera dans un proche avenir particulièrement instructive dans ce sens.

3.4.2. L'essentiel des études théoriques concernant l'usure ondulatoire a été réalisé par certaines compagnies de chemin de fer métropolitain et par divers réseaux européens.

Les premières études portent en général sur des cas précis et localisés, du fait de la faible longueur des réseaux et de l'existence de circulations homogènes. De ces études, il ressort que tous les réseaux de métro et de tramways connaissent l'usure ondulatoire, toujours dans les cas suivants :

- toutes les courbes de rayon $\leqslant$ 400 m
- zones d'accélération
- zones de freinage (sauf en cas de freinage rhéostatique).

Les secondes études ont un caractère théorique beaucoup plus marqué.

3.4.3. Nous allons passer rapidement en revue les principales théories élaborées, concernant l'usure courte. Chaque auteur a sa propre théorie, parfois en contradiction avec celle des autres :

- *DUDGEON (1918)*

  affirme, dès cette époque, que l'adhérence roue-rail varie en fonction de leurs vibrations relatives ; en conséquence, l'inertie de la roue entraîne une érosion inégale du plan de roulement.
- *DI TARSIA (1948)*

  affirme que chaque choc des boudins contre l'un ou l'autre rail provoque un freinage local. L'essieu restitue par la suite l'énergie emmagasinée en provoquant un glissement lorsque la force de rappel de torsion axiale est supérieure au frottement local.
- *MONNET ET PALME (1951)*

  considèrent les deux cas suivants :

  a) courbes de faible rayon : la conicité de la roue ne suffit pas pour compenser la différence de longueur des parcours sur les deux rails, d'où torsion élastique de l'axe et glissement successif de la roue.

  b) en ligne droite, ce n'est que le long du petit axe de l'ellipse de contact rail-roue, que la vitesse relative est nulle ; autour de cet axe, le glissement cause une surchauffe locale qui peut atteindre 700° d'où une "auto-trempe". Ainsi, certaines zones deviennent plus résistantes à l'usure et les crêtes du défaut périodique prennent naissance.

— *TURNER (1954)*

considère que le phénomène est dû à un rebondissement des roues sur le rail d'où résulte une succession de points secs et humides sur la surface de ce dernier ; un durcissement superficiel intervient aux points de contact (rappelons que la formation de martensite entraîne un gonflement du métal). Puis, il y a corrosion des creux humides d'où résulte la formation des ondes. L'uniformité des matériels (diamètre des roues et caractéristiques de la suspension) sont pour lui des facteurs d'aggravation que l'on retrouve dans la plupart des théories. TURNER mentionne d'autres théories antérieures attribuant l'u.o. aux galets de dressage des rails en usine aux vibrations des voiles de roues, à la vibration verticale du rail, aux vibrations de relaxation résultant du pseudoglissement ou aux vibrations de l'essieu.

— Pour *SPADERNA (1956)*, il existe une fréquence prédominante parmi les vibrations verticales du rail, provoquées par un effet de résonance, variable avec la distance entre les traverses. Des chocs se produisent lorsque la fréquence de l'essieu est en phase avec la fréquence du rail.

— *BIRMAN* a tenté de donner en *1958* une explication analogue, mais en admettant qu'il doit exister dans le matériau des "prédispositions" mécaniques ou chimiques particulières.

— *KRABBENDAM (1958)* donne une explication par l'influence de vibrations ultrasoniques de 35 000 Hz de fréquence dans le champignon du rail ; il y ajoute l'influence des contraintes internes (4).

— *MARZANO (1969)* attribue l'u.o. au fait que la structure ne peut pas absorber de façon élastique la quantité d'énergie correspondant à la résistance au roulement.

— *LA MAGNA* (Ingegneria Ferroviaria - mars 1971).

LA MAGNA est parti des observations faites sur le métropolitain de ROME. Il semble être l'un des premiers à avoir essayé d'expliquer l'usure ondulatoire en courbe par la torsion de l'axe de l'essieu. Cette étude n'introduit que la torsion pure de l'axe et fait abstraction des liaisons essieu-caisse. Il a résolu le problème analytiquement, mais ne semble pas avoir fait d'applications numériques.

---

(4) Krabbendam a publié en 1961 un inventaire de l'ensemble des explications proposées à cette époque.

— *CZITARY*

CZITARY a considéré un essieu circulant en ligne droite, mais avec des rayons de roulement différents. Ceci permet, après changement de variable, de se ramener au cas précédent. Il a étudié le cas concret d'un essieu de tramway avec une différence de rayons de roulement de 4 mm.

En fonction de la vitesse, il a obtenu les longueurs d'onde suivantes :

$V_{m/s}$	L_{cm}
5	15,6
10	29,5
15	43,8

Il conclut en disant que les échauffements locaux du rail dus aux frottements expliquent les altérations métallurgiques.

— *JOHNSON & GRAY*

ont émis l'hypothèse en 1975 que l'u.o. était en liaison avec les efforts de contact rail-roue entraînant une plastification, la longueur d'onde étant déterminée par la fréquence propre d'oscillation des éléments au contact, compte tenu de leur déformation élastique réciproque.

— *SRINIVASAN (1975)*

ayant accompli une série d'essais avec un appareillage AMSLER pour test d'usure, a constaté que l'usure ondulatoire n'apparaît que pour un effort tranchant entre rail et roue, compris entre 22,26 kg/mm² et 25,8 kg/mm². Ceci pour n'importe quel acier, traitement thermique, âge ou ligne où le rail était installé.

Dans cet intervalle critique, l'apparition et le développement de l'u.o. seraient conditionnés par l'enlèvement de particules et fragments formés par l'usure.

Il estime que l'u.o. provient d'une mauvaise adaptation du module de voie à la charge de roue ; une bonne adaptation non seulement éviterait l'apparition d'u.o., mais permettrait la disparition d'une usure existante, sans meulage.

— On a également envisagé des déformations plastiques dues à l'état de surface du rail neuf, ainsi que l'oxydation de la surface des rails sous l'action des déformations plastiques (FINK).

— *KARL WERNER (1976)*

décompose les oscillations de flexion de la roue en deux ondes de flexion. L'une se propage dans le sens de rotation de la roue,

l'autre dans le sens opposé. Pour une roue en mouvement, ce sont deux ondes se propageant à des fréquences différentes. L'écart entre ces fréquences est proportionnel à la vitesse de rotation ainsi qu'à la circonférence de la roue. Il s'ensuit un phénomène de battement dont la fréquence est proportionnelle à la vitesse. Pour une certaine vitesse, il peut donc y avoir résonance avec la fréquence propre de la voie.

Cette théorie permet d'expliquer les longueurs d'onde de 3 à 8 cm.

— *HANS HAAS (1976)*

Cet auteur développe une théorie à partir de l'accélération verticale au niveau du contact rail-roue. Il décompose l'accélération en deux termes : a_v et a_r :

1) a_v dû à la masse de l'essieu et des masses suspendues.

La fréquence du système essieu monté étant de l'ordre de 20 à 40 Hz (suspension primaire relativement souple), donc faible devant celle des rails, il considère que a_v est constant.

2) a_r dû aux vibrations verticales du rail.

Cela lui permet de calculer la force verticale au contact rail-roue et en particulier ses valeurs extrêmes.

Il explique ainsi l'usure ondulatoire par le polissage du rail dû aux vibrations du voile de roue lorsque celle-ci est déchargée, et par la corrosion de roulement lorsqu'elle est chargée.

— *R.I. MAIR (1977)*

constate la proximité entre la fréquence de résonance du système rail-roue et la fréquence (spatiale) de l'u.o. sur le rail.

— *DANIELS et DEVINE (1983)*

ont montré une croissance exponentielle de l'u.o. en fonction de l'effort au contact rail-roue.

La dureté des surfaces et le coefficient de frottement seraient les deux paramètres déterminants pour la croissance de l'u.o. La charge axiale et la largeur de l'aire de contact jouent également un rôle. D'après les auteurs, il existe une corrélation entre la fréquence de vibration du rail et la fréquence de résonance de la traverse considérée comme une poutre libre. La coïncidence entre cette dernière et la fréquence spatiale de l'u.o. identifie la traverse comme une cause possible.

3.4.4. Nous nous étendrons un peu plus longuement sur une analyse complète des phénomènes d'u.o. moyenne et courte faite en 1951 par *CHARTET* (SNCF), qui a pris en compte l'ensemble des phénomènes vibratoires au contact rail-roue, ce qui l'a d'ailleurs amené à conclure qu'''il apparaît matériellement impossible d'empêcher les essieux de vibrer au cours du roulement au voisinage de leur fréquence propre et également impossible d'empêcher ces vibrations de laisser une marque sur le rail''. On peut donc dire qu'il est matériellement impossible d'empêcher la formation et le développement de l'u.o. ; tout au plus peut-on espérer en retarder l'apparition par un meulage préventif. Dans ces conditions, le meulage se révèle être un élément fondamental d'une maintenance économique du rail et par conséquent de la voie.

L'ensemble essieu-voie constitue donc un système vibrant pouvant entrer en résonance avec l'usure ondulatoire préexistante. Par ailleurs, CHARTET a constaté qu'un même essieu parcourant deux fois de suite la même voie oscille de façon identique et que les vibrations des deux roues d'un même essieu sont pratiquement indépendantes.

Les accélérations les plus importantes de vibration d'un essieu se situent dans la bande de 700 à 1 000 Hz, avec une accélération qui, en cas de présence d'u.o., peut atteindre 80 g.

A partir de la théorie de HERTZ, on peut montrer que l'aire de contact rail-roue se comporte comme une mince couche élastique de rigidité r :

$$r = kP^{1/3}$$

P étant la charge et k un coefficient voisin de $7,10^3$ avec pour unités le kg et le mm.

Supposant une force F de pulsation ω se déplaçant sur le rail à la vitesse V, CHARTET a montré que le phénomène vibratoire le plus important est une onde se déplaçant à la vitesse V, le point de contact de F étant sensiblement sur un ventre. La longueur d'onde est

$$L = 2\pi \sqrt[4]{\frac{EI}{m\,\omega^2}}$$

m étant lié à la masse du rail par unité de longueur.

Dans une plage de vitesses voisines de lf, l étant la longueur de l'u.o. et f la fréquence de vibration de la roue sur un massif rigide, il existe des phénomènes de résonance transitoires sur certains groupes privilégiés d'ondulations variables avec V.

Dans l'aire de contact, il se produit des glissements de relaxation, synchronisés par les variations de la charge, par celles du coefficient de frottement et par la roue elle-même, et dont la longueur d'onde, indépendance de V, est de quelques cm. La vitesse de glissement w subit des variations de même fréquence que P, le maximum de w ayant lieu avant celui de P avec un déphasage d'environ 1/4 de période. Le maximum d'abrasion a donc lieu avant le maximum de P avec un déphasage d'environ 1/8 de période.

Pour CHARTET, l'u.o. prendrait naissance à partir de variations périodiques d'écrouissage en surface des rails, de chocs aux joints ou aux soudures ou des oscillations de relaxatiopn de contact. Il explique comment, à partir de là, l'u.o. peut se développer de plus en plus.

CHARTET montre ensuite que l'u.o. naissante due aux défauts de fabrication des rails, ou résultant de glissements de relaxation, est susceptible d'aggravation conduisant à des efforts dynamiques très élevés. Par ailleurs, à partir de chocs produits par le franchissement de joints ou de soudures, on engendre des surcharges dynamiques très intenses dont les variations, agissant sur les roues dont le glissement est important, provoquent l'apparition de plages trempées situées au voisinage immédiat des crêtes.

Autrement dit, le passage d'essieux à la vitesse critique correspondant à l'usure préexistante, engendre des surcharges pouvant atteindre 100 % de la charge statique et les glissements instantanés qui se produisent sur les crêtes entraînent la trempe de ces dernières. L'élévation de température nécessaire pour atteindre le point de transformation de l'acier n'est atteint qu'à partir d'une pression instantanée très élevée dans l'aire de contact (de l'ordre de 200 kg/mm^2 avec une valeur importante du coefficient de frottement). Les surcharges très élevées semblent résulter de rebondissements très brefs de la roue sur les crêtes (de l'ordre de 1/2 000 de seconde). Ce phénomène ne peut se produire si l'acier est trop doux et dans la mesure où la valeur critique se situerait au voisinage de la limite élastique des aciers à rails courants, on expliquerait la façon aléatoire dont apparaît le phénomène.

L'ensemble de cette théorie donne une explication cohérente de l'apparition et du développement de l'u.o. Elle montre que certains processus de fabrication sont très favorables à la naissance de l'u.o. ; on peut en conclure que le dressage par traction sera certainement un facteur favorable, mais, par contre, le développement de l'emploi de rails durs (nuances 90 à 110), pour des raisons précédemment indiquées, est un facteur nettement défavorable.

3.4.5. Usure moyenne

3.4.5.1. Soit fl la fréquence principale de vibration de la masse non suspendue, et V/l la fréquence excitatrice due à une u.o. préexistante (V : vitesse, et l : longueur d'onde de l'u.o.).

Au voisinage de la résonance, la surcharge dynamique sous chaque roue est sensiblement égale au demi-produit de l'amplitude de l'oscillation par la rigidité d'appui de la roue sur le rail : une usure de 0,1 mm entraîne à la résonance des oscillations de 2 mm d'amplitude et des surcharges dynamiques de 12 à 15 tonnes pour une roue de 10 t. Ceci dit, l'aire de contact rail-roue est l'objet de phénomènes de glissements, et les variations périodiques de charge entraînent des variations de même fréquence de la vitesse de glissement w. CHARTET a montré que le maximum de w précède le maximum de la charge P. Le rail subit alors un double phénomène d'usure par abrasion due au frottement de glissement et de refoulement de métal ou fluage dû aux surcharges dynamiques. L'usure par abrasion est sensiblement proportionnelle à la puissance dépensée par frottement dans l'aire de contact soit $P\varphi f(w)$, φ étant le coefficient de frottement de COULOMB, et la fonction f(w) croissant avec la vitesse.

Si, dans un cycle, la surcharge est maximale en point M, w est maximale en un point M' voisin de M, mais précédant M, et l'usure par abrasion est maximale en un point M'' situé entre M et M'. L'écart entre les deux points est de l'ordre de 1/8 de la longueur d'onde.

Les vibrations d'essieux entrent bien entendu en résonance, avec les ondulations qu'elles ont elles-mêmes créées et, sous l'influence de l'abrasion, le relief à tendance à s'aggraver et les ondulations se déforment.

L'élasticité globale de la voie intervient évidemment dans les phénomènes de résonance qui se produisent, et ceci peut expliquer que, sur certaines zone déterminées, l'u.o. se manifeste, ou au contraire n'apparaisse pas.

3.4.5.2. L'usure moyenne qui apparaît en courbe peut s'expliquer par des considérations analogues à celle que nous venons d'évoquer pour expliquer la naissance de l'u.o. courte ; mais, il s'y ajoute un autre phénomène : la différence systématique de parcours des deux roues d'un même essieu dont la rigidité torsionnelle entraîne une torsion de l'axe suivi d'une relaxation brutale dès que la limite d'adhérence de la roue déchargée est atteinte (la roue basse dans le cas géné-

ral de l'insuffisance de dévers). Une étude exhaustive du phénomène a été effectuée en 1983 par deux élèves de l'ENPC (École Nationale des Ponts & Chaussées de PARIS) qui ont effectué plusieurs modélisations de la circulation d'un essieu en courbe :

— deux modèles à un seul degré de liberté, soit en torsion pure, soit en lacet,

— un modèle à deux degrés de liberté, faisant intervenir le lacet et la torsion d'axe.

— Enfin, un modèle à trois degrés de liberté faisant, outre les hypothèses précédentes, intervenir la translation longitudinale de l'essieu par rapport au bogie, et permettant en outre de traiter les deux cas de l'excès et de l'insuffisance de dévers.

Les constatations faites sont les suivantes : le paramètre le plus influent sur la longueur d'onde de l'usure est le rapport du couple de rappel en torsion de l'axe de l'essieu au moment d'inertie de la roue. La loi de frottement est sans grande incidence ; l'influence du lacet sur la torsion n'est perceptible que pour des valeurs du coefficient de rigidité de translation inférieures ou égales à 10^7 N/m. Ni les caractéristiques de la voie, ni les charges de roues n'ont d'influences marquantes.

Les auteurs estiment que, par glissement sur le rail au moment de la libération de torsion d'essieu, il y a polissage du métal et, par conséquent, diminution du coefficient de frottement, ce qui favorise la libération de torsion exactement au même emplacement pour les essieux successifs. Il conviendrait cependant, pour compléter le modèle, comme dans la théorie de HAAS, de faire intervenir l'élasticité de la plateforme. Les masses suspendues, la flexibilité transversale du rail, l'amortissement de la voie, le travelage, jouent certainement un rôle, tout au moins sur la longueur d'onde de l'u.o.

Enfin, les auteurs rappellent qu'il existe deux origines globales de l'u.o. : l'oscillation de torsion (u.o.I) et la résonance voie essieu (u.o.II), dans des domaines de fréquences respectives différents : 30/100 Hz d'un côté, 200/1 000 Hz de l'autre.

Il semble possible de prévoir quel type d'usure apparaîtra selon la géométrie de la voie et les conditions de circulation.

3.4.5.3. On aboutit suivant les cas aux résultats suivants :

1. *Courbe de très faible rayon* ($R_0 < 300$ m)

Les trains circulant à vitesse réduite, il faut s'attendre à une faible

excitation verticale de la voie. Par contre, étant donné le faible rayon de la courbe, la différence de roulement est importante et donc le phénomène d'oscillation de torsion et de relaxation d'essieu est prépondérant. Il faut donc s'attendre à une u.o. I en file déchargée.

2. *Courbe de faible rayon* (300 m < R_0 < 600 m)

Deux cas doivent être envisagés :

— excès de dévers (faible vitesse des trains). Dans ce cas, l'excitation de la voie est faible. Il faut donc s'attendre à une u.o. I de la file haute.

— insuffisance de dévers (vitesse des trains > 80 km/h). Dans ce cas, l'excitation de la voie peut être importante et plus la plateforme sera souple, plus la vitesse du train sera grande, plus il faudra s'attendre à une u.o. II de la file basse.

3. *Courbe de grand rayon (> 600 m)*

La différence de roulement des deux roues d'un même essieu devient moins perceptible et donc l'usure ondulatoire de type I est peu probable ; l'usure ondulatoire de type II peut apparaître au même titre qu'elle apparaît en alignement, mais avec une prédilection pour la file déchargée.

4. Mesure de l'u.o.

4.1. La mesure de l'usure ondulatoire doit se faire avec une précision de l'ordre de 0,01 mm. Les dispositifs de mesure à l'aide d'une règle et d'une jauge — plus ou moins perfectionnées — ne permettent que des constatations ponctuelles à très faible rendement. Il en est de même avec les règles enregistreuses à curseurs (type Posch, Cemafer) qui transcrivent la mesure sur papier à l'aide d'un style. Ces dispositifs sont en outre peu adaptés à la mesure des ondes longues. C'est pourquoi, divers réseaux (BR, OeBB, SNCF) ont développé plusieurs dispositifs de mesure de l'u.o. donnant une analyse complète de la situation et permettant l'établissement d'un programme économique de meulage.

Tous ces dispositifs opèrent la mesure de façon dynamique. Les plus répandus sont les suivants :

— *La règle FOURCADE*

Ce système, mis au point par M. Fourcade, ingénieur à la SNCF, comprend un chariot à deux essieux (fig. 222) qui supporte deux règles par file de rail, les contacts avec le rail étant assurés par capteurs inductifs. Les ondes courtes sont données par B-C, B et C étant les ordonnées des points correspondants et les ondes longues par (B + C)/2 — (A + D)/2. Il faut dans l'emploi de ce chariot tenir compte de sa fonction de transfert (annexe 7) représentée par la fig. 223 : il ne présente aucune difficulté pour l'enregistrement à une vitesse de 15 à 20 km/h des ondes courantes de longueur d'onde comprise entre 0,05 et 1,70 m. En variante, les appareils portatifs PL 25 et PT 25 de Speno (fig. 47) permettent la mesure de l'u.o. de deux files de rails et le profil transversal (usure).

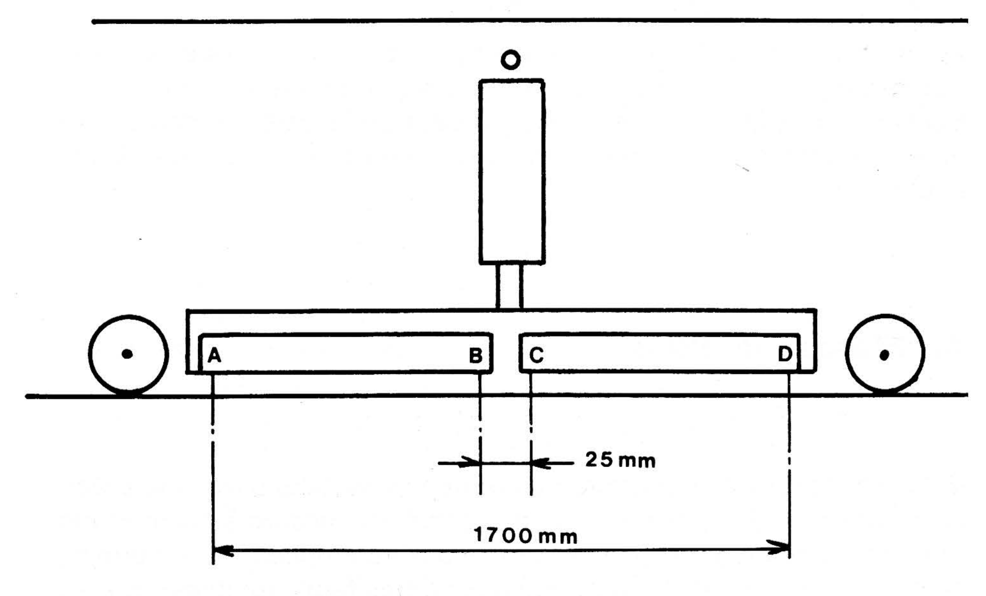


Fig. 222. — *Chariot FOURCADE*

— *Le chariot SPENO SC 805*

Ce chariot était utilisé il y a quelques années. Disposé sous le train meuleur, il porte des transducteurs disposés comme indiqué sur la fig. 224, mesurant la distance par variation de champ magnétique et à partir desquels on détermine la profondeur des ondes

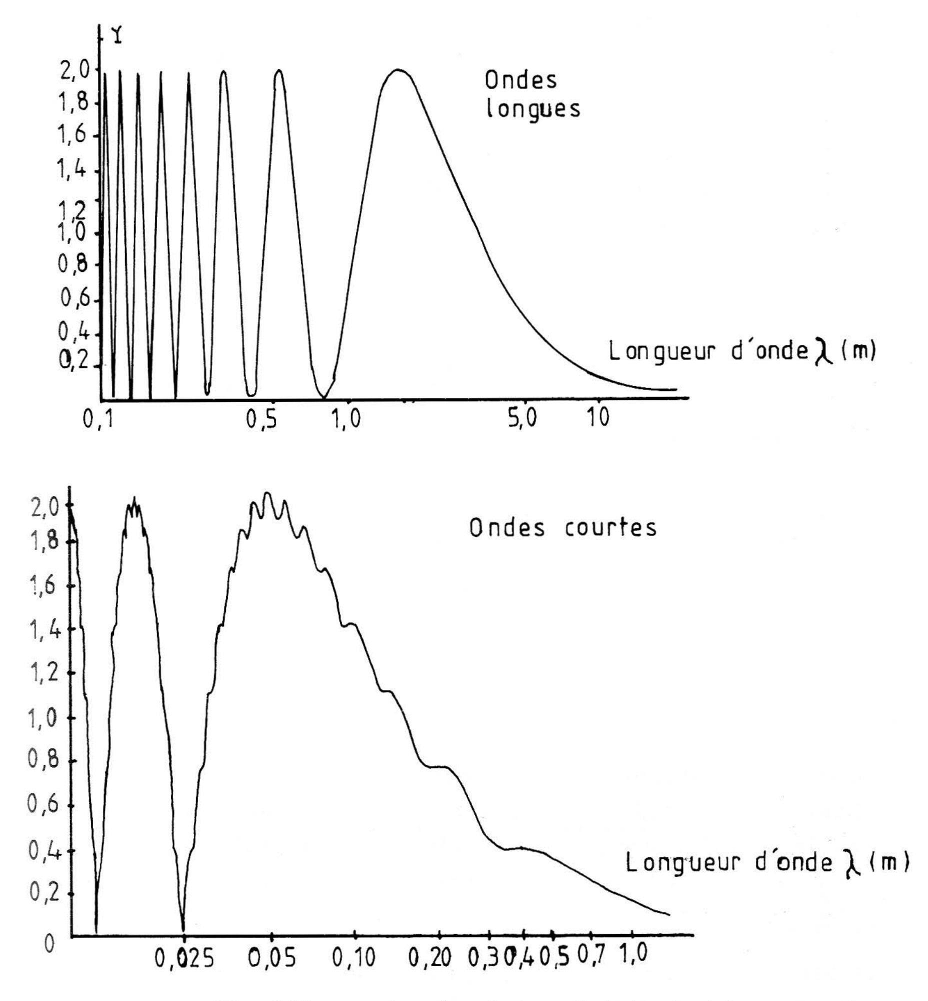


Fig. 223. — *Fonction de transfert du chariot*

courtes par A-C, celle des longues par A-B. L'affaiblissement dû à la fonction de transfert, similaire à celle de la règle Fourcade est compensée par un filtre correcteur. Ce chariot permet le contrôle permanent du travail exécuté.

Il est également possible d'équiper le chariot d'enregistrement avec un ensemble de capteurs inductifs moins sensibles aux influences extérieures que les capteurs sans contact. On les dispose en fonction des longueurs d'ondes moyennes, courtes et longues que l'on veut mettre en évidence : le tracé de la fonction de transfert

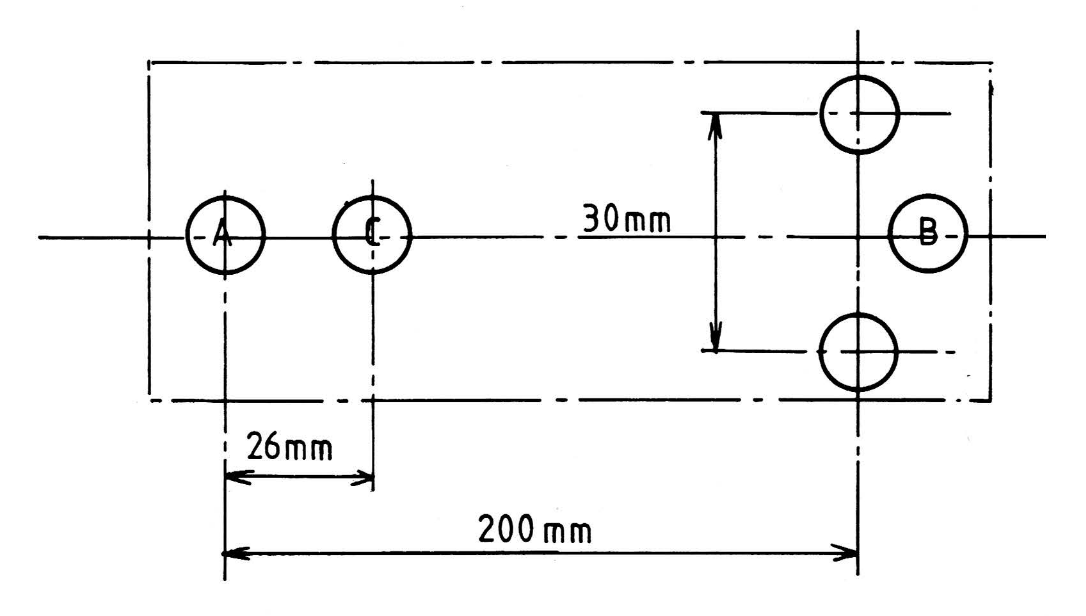


Fig. 224. — *Chariot 805*

se fait sur ordinateur et l'on peut la modifier par retouches successives en agissant sur la position longitudinale des capteurs en fonction du but poursuivi. La figure 225 donne le schéma adopté sur un train SPENO USA et la fonction de transfert correspondante.

— *Le chariot de mesure Speno AC 205*

Le Speno AC 205 est un chariot de mesure compact conçu essentiellement pour la mesure des ondes courtes.

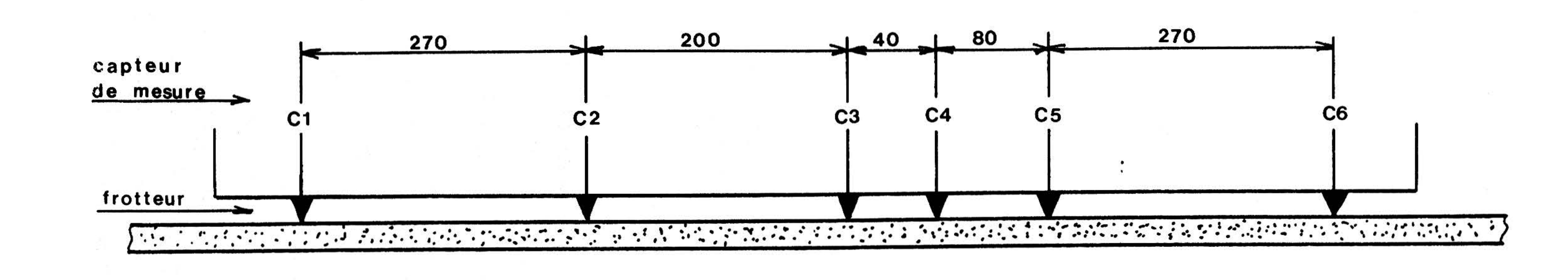
Il est constitué des éléments suivants :

- un chariot tracté par la machine de meulage équipé d'un dispositif tachymétrique,
- deux skis de mesure, un sur chaque rail, équipés d'un capteur électromagnétique (du type sans contact) (fig. 226),
- une unité de traitement électronique,
- un enregistreur graphique à deux pistes.

Les deux demi-skis par file de rail constituent une base de référence pour le capteur inductif qui se déplace verticalement suivant la surface du rail. Le dispositif tachymétrique est utilisé pour le pilotage des filtres électroniques et de l'enregistreur.

REPARTITION DES POINTS DE MESURE SUR UN

PATIN DE MESURE

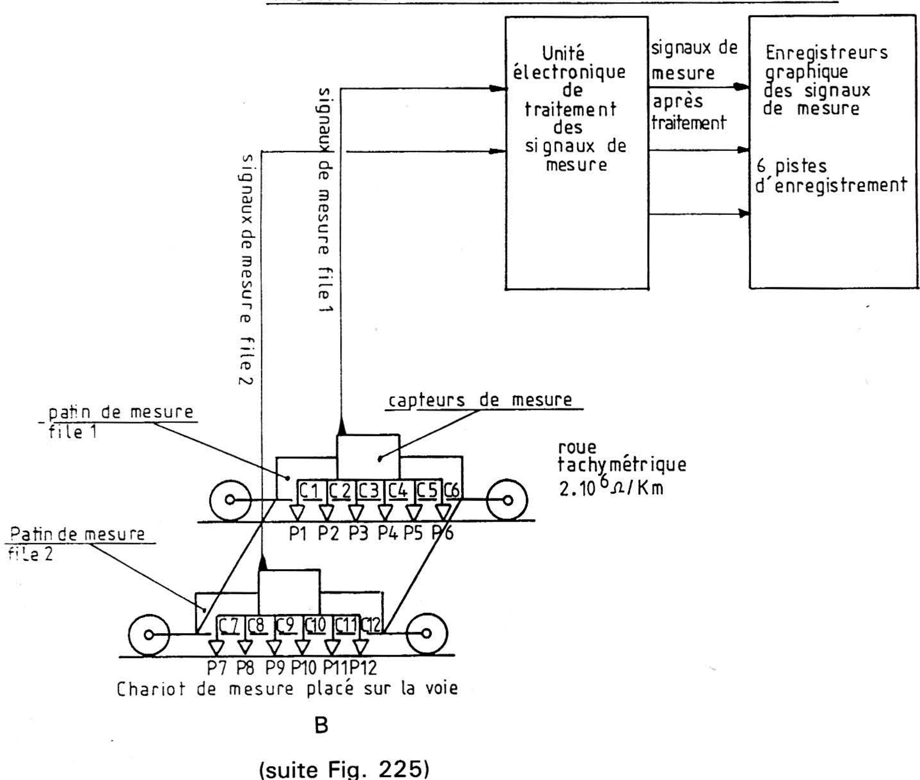


Détail des calculs pour l'élaboration de l'amplitude des défauts de la surface du rail

- a1 (défauts d'ondes courtes) = 0,4 C2 + 0,5 C4 + 0,5 C6 - 1,4 C3
- a2 (défauts d'ondes longues) = 0,556 C6 + 0,444 C1 - C3

A

Fig. 225 A/B. — *Schéma de chariot de mesure*



B

(suite Fig. 225)

— *Chaîne de mesure AC 211*

La chaîne de mesure AC 211 installée sur les trains meuleurs est constituée :

- d'un chariot de mesure solidaire du train et équipé d'un dispositif tachymétrique,
- de deux patins de mesure (un par file de rail) qui sont installés sur le chariot de mesure ; chaque patin de mesure est équipé de six capteurs électroniques de mesure,
- d'une unité de traitement électronique des signaux de mesure,
- d'un enregistreur graphique.

Chacun des deux patins de mesure (fig. 225 B) est équipé de six frotteurs métalliques qui glissent sur la table de roulement du rail. Ils sont équipés de pièces d'usure en carbure de tungstène, ce qui leur assure une durée d'utilisation importante (7 000 km).

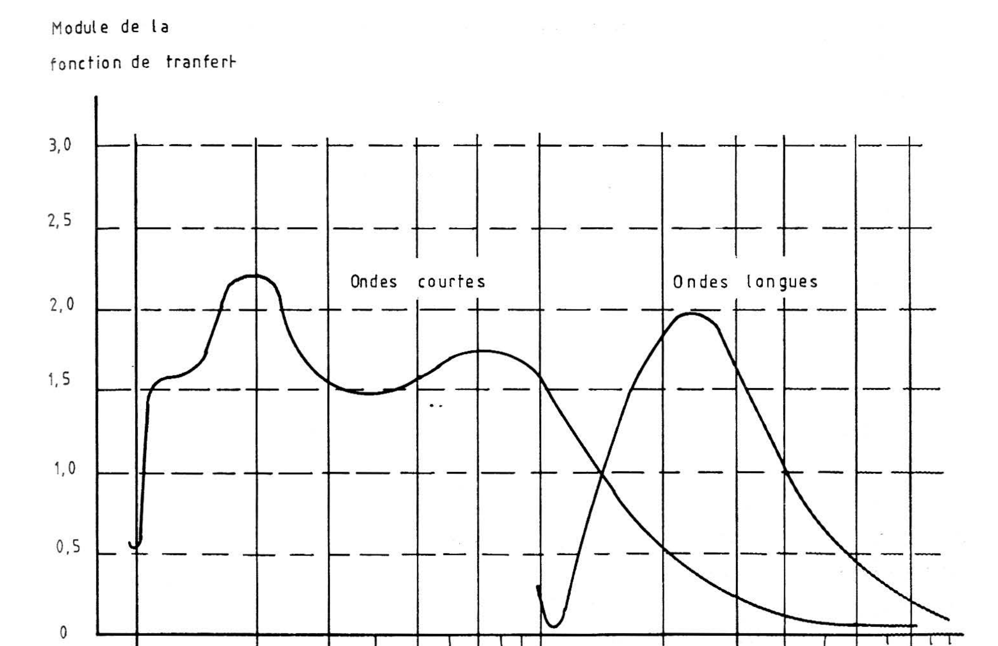


Fig. 226. — *Fonctions de transfert*

La répartition des frotteurs résulte d'une étude d'optimisation de la bande passante des défauts à mesurer.

Les frotteurs P2, P3, P4, P5 sont affectés à la mesure des défauts de longueurs d'ondes comprises entre 0,035 et 0,50 m. Les frotteurs P1, P3, P6 sont affectés à la mesure des défauts de longueurs d'ondes comprises entre 0,50 et 2,80 m.

— *Le véhicule d'enregistrement SPENO SM 775*

Un chariot porté par un véhicule à deux bogies est équipé de quatre accéléromètres par file de rail. Par double intégration du signal mesuré, on obtient la distance. La précision de la mesure est de 0,01 mm à la vitesse de 60 km/h. Une roue codeuse reliée à la boîte de vitesses assure la mesure des distances parcourues et des longueurs d'onde de l'usure.

L'enregistrement analogique des données conduisant à la production difficilement exploitable de plus de 10 m de papier par jour (50 mm/km), le SM 775 peut fournir une double analyse digitale par ordinateur.

Dans le tableau 31 dans lequel la première colonne représente les PK par tronçons de 100 ou 200 m et les suivantes, pour chaque file de rails, le % de 0,02 en 0,02 mm des profondeurs d'usure mesurées dans la zone ; par exemple la figure montre que, dans les 200 m précédant le PK 119,6, 40 % des ondes ont une profondeur de 0,02 à 0,04 mm, 50 % de 0,04 à 0,06, 10 % de 0,06 à 0,08 et moins de 5 % de 0,08 à 0,1 mm (Tableau 31, p. 580).

L'analyse du tableau 32 résume l'information obtenue en vue de l'établissement d'un programme de meulage ; par exemple : la première ligne indique que du PK 116,6 au PK 117,6, soit 1 km (astérisques correspondant chacun à 200 m de voie), l'u.o. la plus profonde se situe dans la classe 2 de 0,04 à 0,06 mm. On peut établir à partir de cette analyse des histogrammes par classe en vue de déterminer la profondeur économique de meulage (Tableau 32, p. 582).

4.2. Mesure en continu du profil transversal

A cet effet, Speno a mis au point un système de mesure continue du profil transversal à l'aide de palpeurs, schématisé par la fig. 227.

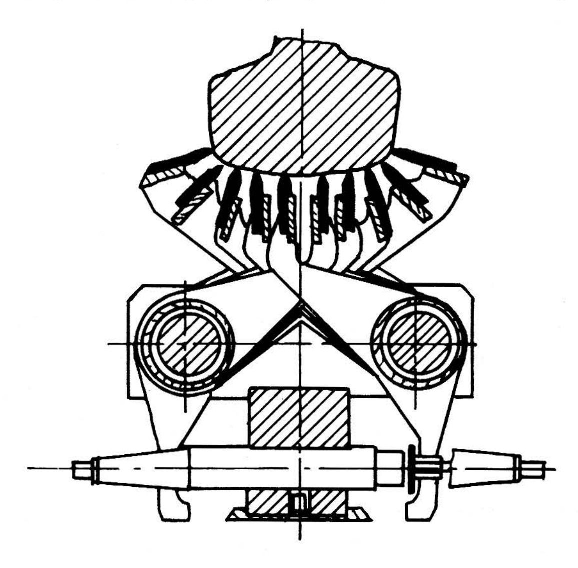


Fig. 227. — *Mesure de profil transversal du rail*

Les informations recueillies sont transmises électriquement au tableau de contrôle et affichées sous forme de colonnes de diodes lumineuses (fig. 228). Il n'est pas impossible que, dans l'avenir, un tel dispositif puisse commander directement la position des meules la mieux adaptée au reprofilage transversal.

5. Meulage

5.1. Le meulage a pour objectif la réduction des défauts géométriques verticaux des rails dont les longueurs d'onde sont comprises entre 2,5 m et 0,04 m, alors que l'action du bourrage est particulièrement efficace pour des longueurs d'onde de défauts de 40 m à 5 m ; pour les longueurs d'ondes intermédiaires, entre 5 m et 2,5 m, les deux méthodes sont d'une efficacité réduite.

Le meulage s'avère particulièrement efficace à l'égard des défauts de fabrication des rails, de longueurs d'ondes comprises entre 1,6 m et 1,8 m et, dans une moindre mesure, à l'égard des harmoniques de soudures, en particulier à 4,5 m et 3 m. Il nécessite au préalable un nivellement correct et en barres courtes des joints en bon état, d'ou la nécessité d'un entretien préalable.

5.2. Traitement curatif de l'u.o.

Nous citerons pour mémoire deux cas extrêmes :

— rail isolé affecté d'u.o.

Il est évident qu'il serait anti-économique de déplacer un engin de meulage de forte puissance. Plusieurs fournisseurs proposent des appareils légers déplaçables sur rail et pouvant être guidés horizontalement pour assurer la précision nécessaire de quelques centièmes de mm,

— zone affectée d'u.o.

mais destinée à être renouvelée à échéance relativement brève (un à deux ans au maximum) : les rails seront reprofilés en atelier après dépose ; il est donc inutile de procéder à un traitement curatif

en voie. Une telle situation ne peut toutefois se prolonger trop longtemps, surtout si l'usure est importante.

5.3. Procédés de meulage

5.3.1. On distingue trois procédés de meulage dans lesquels les meules sont toujours appuyées sur le rail avec une certaine force :

— Meules rotatives

Les meules généralement en forme de cyclindre pleins ou creux, parfois de troncs de cônes, tournent autour d'un axe inclinable, situé dans un plan perpendiculaire à l'axe longitudinal du rail (fig. 229).

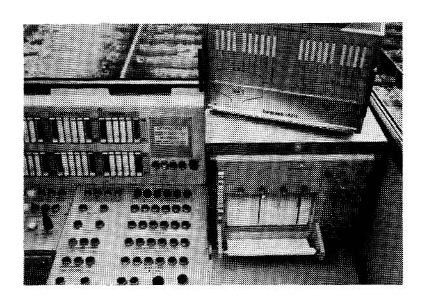


Fig. 228. — *Barographe*

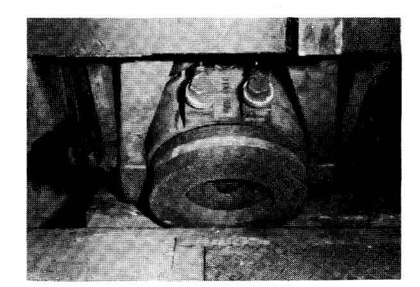


Fig. 229. — *Meule rotative*

— Patin meuleur glissant fixe.

— Meules glissantes oscillantes animées de mouvements d'allers et retours longitudinaux.

— Meules rotatives

Cette méthode, la plus performante, est à la base des engins et trains SPENO, répandus dans le monde entier.

La meule, en forme d'anneau, est appuyée pneumatiquement sur le rail.

Son axe de rotation reste toujours dans un plan vertical perpendiculaire à l'axe du rail, mais peut s'incliner à l'intérieur et à l'extérieur pour suivre le profil du champignon. La pression, commandée manuel-

lement ou automatiquement, peut atteindre 1,5 kN par meule absorbant une puissance de l'ordre de 20 kW.

En automatique, le réglage s'opère en fonction du courant d'alimentation réclamé par le moteur (fig. 230).

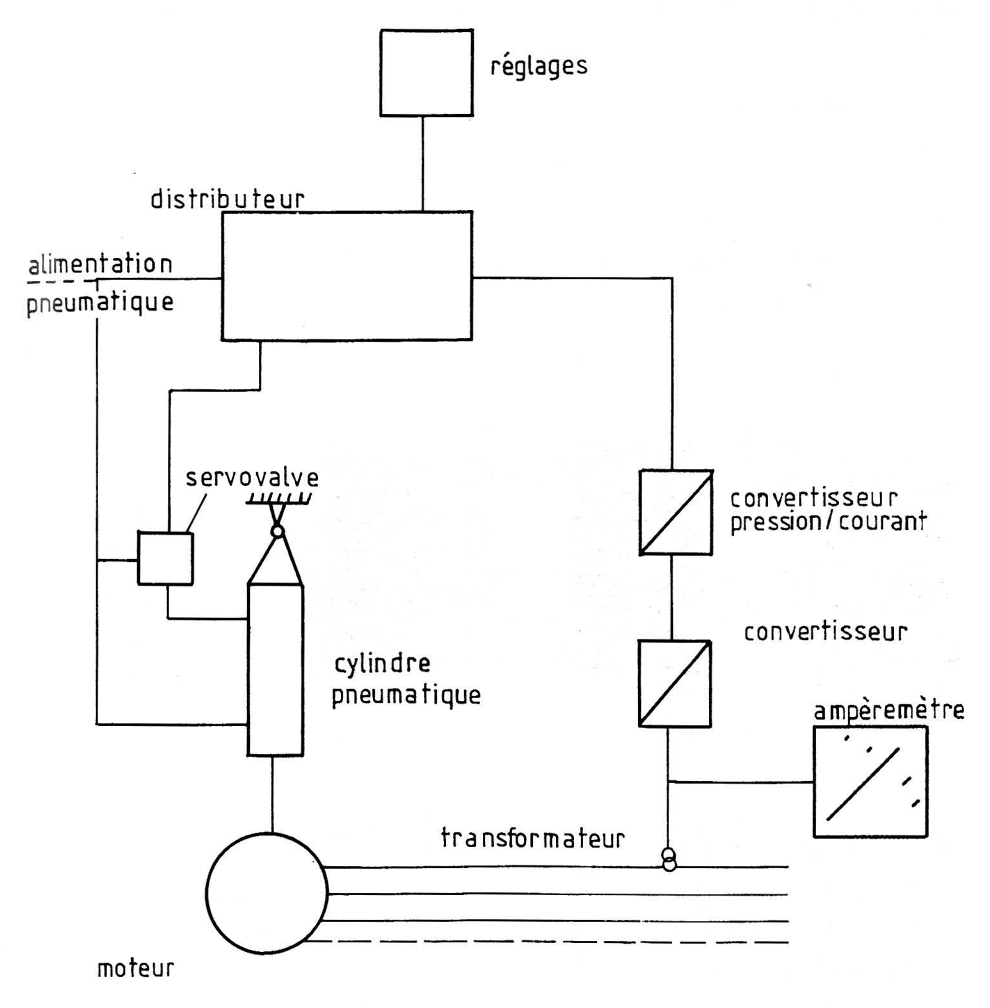


Fig. 230. — *Schéma du dispositif de réglage de la pression des meules*

Les meules, d'un diamètre de 260 mm, tournent normalement à 3 600 tours minute. Pour le meulage des ornières (aiguilles, rails à gorge), on utilise, du fait de l'espace réduit disponible, des meules d'un diamètre de 130 mm à 7 200 t/min. ou des meules en forme de tronc de cône.

L'unité de meulage comprend une meule équipée d'un moteur électrique. Un système de centrage rapide permet le changement de meules en quelques minutes. Bien que les meules en corindon noyé dans de la bakélite aient une durée de vie moyenne de 8 à 10 h, l'expérience a montré qu'après 4 h de service ininterrompu le remplacement procurait une plus grande efficacité, le temps perdu pour le changement et le coût des meules étant compensé par une productivité plus élevée.

5.3.2. Sur les trains de première génération, il existe deux types d'unités de meulage :

— *l'unité de rectification*

Quatre unités de meulage sont placées dans un cadre rigide au-dessus de chaque file de rail, en vue d'attaquer les sommets d'ondes, les uns après les autres, sans suivre le profil (fig. 231).

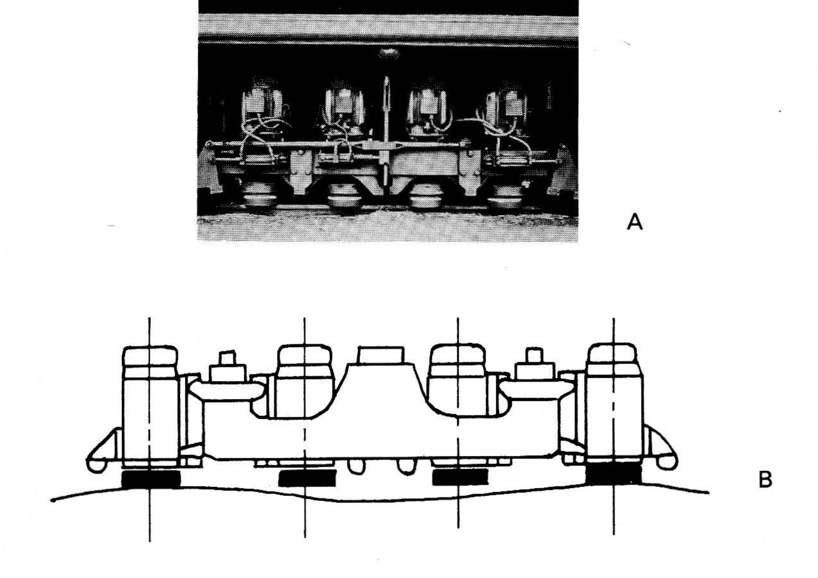


Fig. 231 A/B. — *Chariot de meulage*

Le travail correspondant, dit à meules bloquées, permet le traitement des ondes moyennes et longues. Les unités peuvent cependant être rendues indépendantes du cadre rigide et permettent alors le traitement de l'u.o. courte, le jeu vertical pouvant attein-

dre 30 mm. Le blocage ou l'indépendance des unités est piloté électroniquement depuis la cabine. On peut incliner de 10 à 15° sur la verticale de chaque côté le cadre avec son groupe de quatre unités.

— *l'unité de reprofilage*

Suivant le type du train de meulage, on monte trois ou quatre unités sur un berceau inclinable par un système articulé à parallélogramme, de façon que chaque unité puisse prendre des angles variables par rapport à la verticale du rail de 30° vers l'extérieur jusqu'à 90° vers l'intérieur (fig. 232) ce qui permet de traiter la

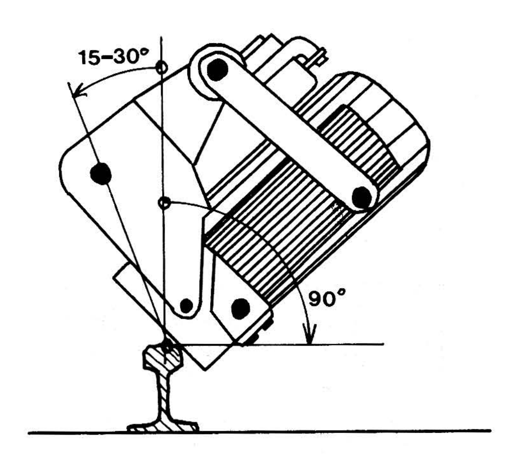


Fig. 232. — *Inclinaison des meules*

totalité de la partie du profil en contact avec le bandage des roues. L'angle d'inclinaison peut être commandé depuis le tableau de bord. On peut ainsi obtenir un traitement complet du profil de rail en contact avec le boudin de roue sous forme d'une ligne polygonale tangente au profil. Les facettes formées s'arrondissent au passage des trains de sorte que l'on obtient rapidement une surface convexe parfaitement régulière.

5.3.3. Sur les trains modernes, les unités sont montées sur des berceaux pivotants leur permettant d'occuper toute position angulaire dans un champ allant de − 75 à + 75 degrés par rapport à l'axe vertical du rail.

Les unités de meulage peuvent être bloquées 2 à 2 pour la rectification des ondes longues ; leur position angulaire est contrôlée et ajustée depuis l'intérieur de la cabine, voire sélectionnée automatiquement sur la base de configurations angulaires préalablement choisies et gardées en mémoire dans une unité centrale de traitement.

La pression d'application est aussi contrôlée automatiquement de façon à maximiser le rendement de chaque meule. Sur les machines les plus récentes, les valeurs de pression et inclinaison des meules sont affichées sur un écran vidéo, l'opérateur se limitant à contrôler par ce biais le processus de meulage. Entre chaque passe, il peut sélectionner une nouvelle famille de valeurs des paramètres de meulage, en fonction de la surface et du profil du rail.

5.4. Les trains de meulage

5.4.1. Les trains SPENO comprennent, suivant leur type, un certain nombre de wagons meuleurs ainsi que les wagons énergie/habitation/atelier et contrôle, en partie couplés avec les wagons meuleurs. Ils sont tractés par une locomotive diesel à une vitesse de travail de 5 à 8 km/h. Les wagons, à deux essieux ou deux bogies peuvent rouler jusqu'à 80 km/h en marche haut-le-pied. Des précautions sont prises pour éviter la pénétration de poussière de meulage dans les wagons qui sont équipés d'un bouclier métallique et d'une protection latérale contre l'éclatement, à vrai dire très rare, d'une meule.

5.4.2. Chaque wagon rectifieur est équipé, par file de rail, du dispositif décrit précédemment, avec un total de huit unités de meulage, chacune d'une puissance en général de 15 kW. Dans le cas des wagons à bogies plus longs du train URR 112 B des SZD, chaque file de rail comporte deux unités de rectification par wagon.

5.4.3. Chaque wagon reprofileur comporte un ou deux chariots de reprofilage par file de rail comprenant chacun trois unités de meulage, soit par wagon de 6 à 12 unités de meulage de 11 kW chacune. La puissance moyenne de la locomotive nécessaire est d'environ 500 kW et chaque train est équipé de 2 moteurs diesel de 840 kW

fournissant du courant à 440 V pour l'alimentation en énergie des moteurs de meules.

5.4.4. Le reprofilage permet une bonne adaptation du profil du rail et du profil d'usure du boudin et dans les lignes sinueuses à essieux chargés, il permet une importante économie sur les roues qu'une étude sur un réseau minier australien a chiffré à 400 %.

5.4.5. Les autorails de meulage limités à un seul engin sont conçus principalement pour des réseaux de faible étendue et des lignes de métro et de tramways.

Les principales caractéristiques et la composition des divers trains modernes SPENO, dont la première réalisation remonte à 1961 figurent dans le tableau 33 et sur les fig. 233, mais d'autres compositions sont possibles.

TABLEAU 33

— *Trains RR 1205 A + B / RR 1455 A + B*

Mise en service en 1975/1981, modernisés en 1982.

Composition : 2 locos de 620 kW
2 wagons générateurs de 850 kW chacun
2 wagons de meulage des passages à niveau avec chacun 16 unités de 5 kW
4 wagons de reprofilage comprenant chacun 8 unités de 15 kW
8 wagons de rectification comprenant chacun 8 unités de 15 kW

- longueur totale : 180 m
- poids total : 700 t
- au total 128 unités de meulage.

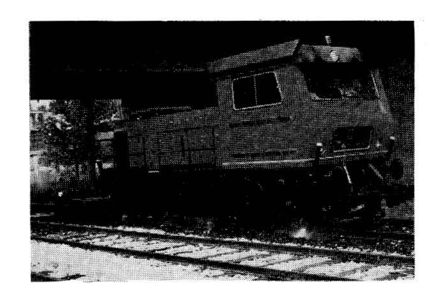
— *Unité URR 32*

Engin automoteur équipé de 32 unités de meulage de 11 kW et d'un dispositif de mesure AC 205.

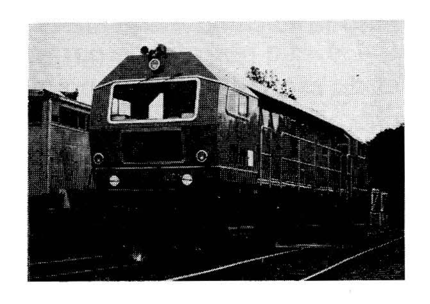
— *Unité de meulage URR 28*

Cette machine comporte 28 unités de reprofilage et rectification de 11 kW et 16 unités de même puissance pour les appareils de voie et les passages à niveau.

Fig. 233. — *Trains et véhicules SPENO :*



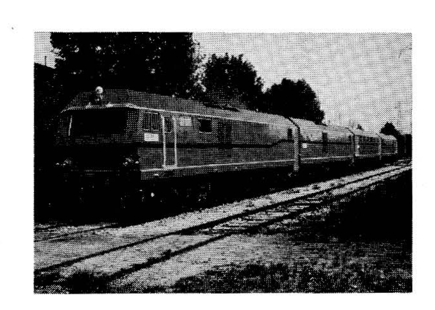
A/ RR 16 P



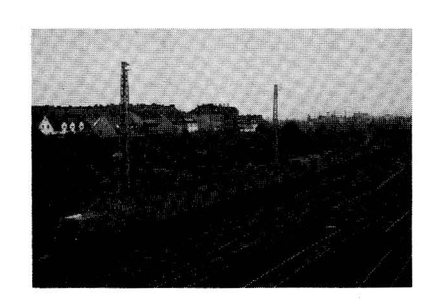
B/ RR 16 P/D



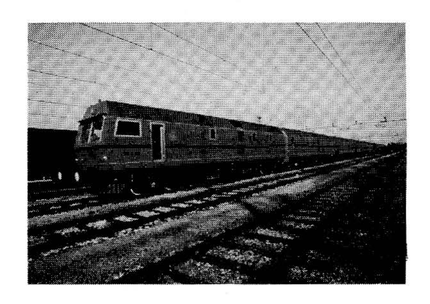
C/ RR 28



D/ RR 48



E/ 1205 A-B



F/ URR 112

— *Unité URR 48*

Composition : 3 wagons avec 16 unités de reprofilage de 11 kW et 32 unités de rectification de 15 kW chacune

— *Train URR 112*

Mise en service en 1984 sur les SZD, c'est actuellement le train le plus moderne dont tous les wagons sont montés sur bogies. Il comprend :

- 2 wagons générateurs de 600 kW chacun
- 2 wagons de reprofilage à 8 unités
- 2 wagons de reprofilage à 16 unités
- 4 wagons de rectification à 16 unités

soit un total de 10 wagons et 112 unités de meulage de 11 kW chacune. La longueur totale du train est de 180 m et son poids de 600 tonnes. La vitesse de déplacement est de 90 km/h et celle de travail de 6-8 km/h.

— *Train RMS 1*

C'est un train analogue au précédent, mis en service aux USA en 1983. Il est équipé de 120 unités de meulage de 15 kW. Le RMS 2 est équipé de 96 meules.

— *Meuleuse RR 16 P*

C'est un engin à deux essieux spécialement destiné au traitement des appareils de voie et des P.N. Il est équipé de 16 unités de meulage de 11 kW chacune. La variante RR 16 PS est équipée de dispositifs d'aspiration des poussières et filtration des gaz d'échappement pour travailler dans les réseaux souterrains. On peut aisément combiner le nombre et la disposition des wagons pour répondre à tous les besoins qui peuvent être exprimés par les réseaux.

— *Meuleuse rail-route RLT 16*

Cet engin, muni de roues rail et de roues à pneus, peut meuler des rails Vignole ou des rails à gorge. Il est équipé de deux unités de meulage sur chaque file de rail, de 6 kW pour chaque meule. La vitesse de travail est comprise entre 3 et 5 km/h et il peut travailler en courbe jusqu'à 20 m de rayon.

Il existe d'autres types de trains et véhicules automoteurs à nombre variables de meules, adaptés aux besoins des réseaux.

5.5. Méthode à meules fixes

Principe : on utilise des meules rectangulaires de 35 à 70 cm de longueur. Le procédé fonctionne avec une amenée permanente d'eau sur la surface meulée, afin d'éliminer les petites parcelles de meules et de métal, de réduire le frottement et, par conséquent, l'effort de traction et de refroidir le rail. Ce procédé fut le premier employé (système SCHEUCHZER) vers les années 50.

Les engins se composent d'un ou deux wagons meuleurs et d'autant de wagons-citernes pour l'eau nécessaire. La fig. 234 représente différents types de trains utilisés par les SZD. Entre les essieux, il y a trois poutres de meulage avec chacune 4 meules de dimensions 380, 70 et 150 mm.

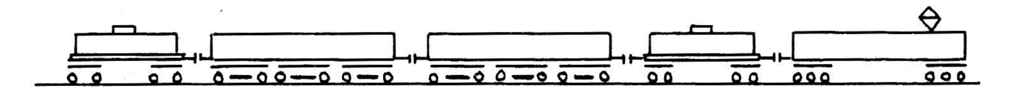


Fig. 234. — Schéma du train SZD à meules fixes

Chaque poutre comprend un cadre fixe avec 4 rouleaux de guidage et deux supports mobiles avec chacun 2 meules. Les rouleaux sont appuyés avec une force pneumatique de 3 à 7,5 kN sur le rail afin que les meules restent toujours centrées sur la surface de roulement.

Les meules utilisées composées de corindon aggloméré avec de la poudre de bakélite ont une marge d'usure en hauteur de 110 mm.

La vitesse haut-le-pied est de 80 km/h. Celle de travail dépend principalement du nombre de wagons, de la pression de la meule sur le rail et du type de tracteur ; elle varie de 25 à 80 km/h. La quantité de métal enlevé par passe varie en fonction des divers paramètres entre 0,01 et 0,05 mm de sorte que les ondes habituellement rencontrées nécessitent de 12 à 50 passes. Les principaux paramètres sont :

— pression (à 40 km/h)

pour 24 N/cm2	0,016 mm par passe
pour 27	0,020
pour 30	0,022

— vitesse de meulage

de 25 à 30 km/h	0,030 mm par passe
de 40 à 50	0,024
de 60 à 70	0,018

— nombre de passes

pour 12 passes	0,052 mm par passe
pour 38	0,028
pour 52	0,024
pour 75	0,018

5.6. *Méthode à meules oscillantes*

Il y a mouvement d'oscillation continu des meules dans le sens de la longueur. L'efficacité est donc a priori plus importante qu'avec des meules fixes. Les éléments utilisés sont ou de simples meules rectangulaires ou des meules de forme pour la surface de roulement et le congé de roulement.

La meule est appuyée hydrauliquement sur le rail avec une force de 3 kN et dotée d'une oscillation longitudinale d'une amplitude de ± 100 mm à la fréquence de 2,5 à 3 Hz. Une arrivée d'eau permanente évite la poussière et les étincelles.

Le véhicule PLASSER comporte un cadre fixe avec 4 à 6 meules oscillantes. La fig. 235 représente le type GWM 220. C'est un véhicule tiré par une draisine comportant un total de 12 meules par file de rail. Un cadre se déplaçant sur des roues comprend 2 × 3 meules. Il constitue pour les meules une base rigide de 2 500 mm de long, si bien qu'elles travaillent régulièrement sur toute la longueur des sommets d'ondes.

Données techniques :

- Vitesse de travail : 1 200 à 1 400 m/h
- Vitesse haut-le-pied : 80 km/h
- Motorisation : 220 kW
- Meulage : de 0,03 à 0,07 par passe.

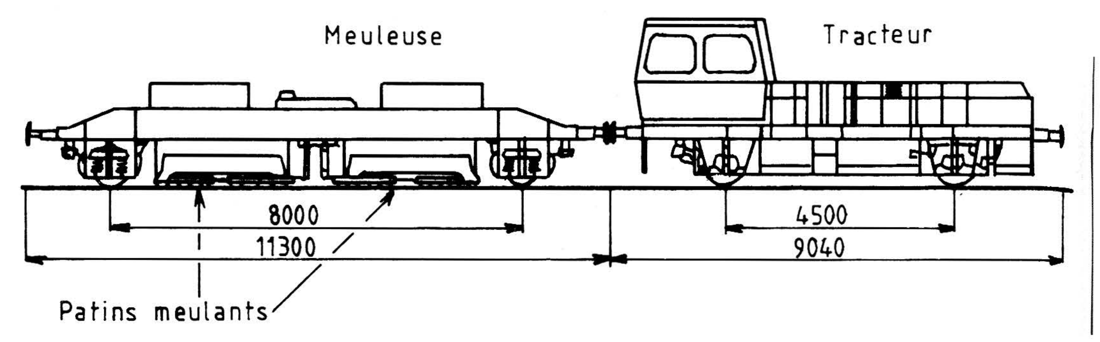


Fig. 235. — *Train à meules oscillantes*

5.7. Rabotage

On reforme le profil du rail par rabotage. On dispose à cet effet des outils spéciaux de métal dur sous différents angles par rapport à l'axe du profil du rail. Pour le reprofilage du congé de raccordement, on utilise généralement trois couteaux :

a) un outil droit à 45° pour enlèvement de la bavure ; suivant la dimension de cette dernière, trois passes peuvent se révéler nécessaires.

b) deux outils droits sous des angles de 67,5 et 22,5 °.

c) un outil de forme qui reconstitue l'arrondi désiré du champignon. Pour le reprofilage de la surface de roulement, on utilise deux couteaux (fig. 236).

d) un couteau droit qui crée une surface plane au milieu du champignon.

e) deux couteaux droits avec une légère pente pour s'adapter au profil du champignon.

La machine PLASSER SBM 200 comporte une raboteuse à quatre essieux et un ramasseur de copeaux à deux essieux. Le système de rabotage appuyé hydrauliquement sur chaque file de rail se déplace à l'aide de roues. Des roues palpeuses à axe vertical assurent le guidage latéral.

Le ramasseur de copeaux est équipé, pour chaque file de rail, de deux tambours magnétiques qui recueillent les copeaux des deux côtés du rail dans un récipient ad hoc.

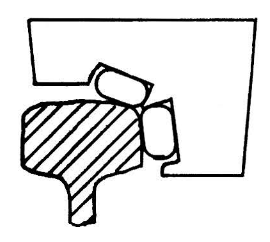


Fig. 236. — *Couteaux de rabotage*

Données techniques :
- Vitesse : 80 km/h
- Vitesse de travail : 1 - 2 km/h.

La machine convient bien à l'ébavurage des rails en voie et peut être utilisée avec succès dans les gares de triage sur les voies où l'on utilise des sabots d'enrayage. Le reprofilage complet d'un champignon de rail nécessite 10 outils, 3 pour chaque congé et 4 pour la surface de roulement. Pour les fortes bavures, on peut avantageusement combiner cette méthode avec le procédé SPENO.

En fait, les zones d'emploi de ce système paraissent très limitées, la précision étant sans commune mesure avec celle que l'on peut obtenir par rabotage sur marbre en atelier.

On peut également dire que le meulage rotatif est nettement plus précis que les autres systèmes. Il permet, en particulier, par le choix de la position des meules, de déterminer a priori le profil définitif, alors que le bloc-patin tend à prendre une forme plus ou moins bien définie. Enfin, à puissance égale, le rendement du meulage rotatif est plus élevé, donc le prix de revient plus faible.

6. Établissement des programmes

6.1. Les programmes doivent être établis à partir des relevés des véhicules d'enregistrement. Il est souhaitable, dans un but d'économie globale, de meuler toutes les zones où le creux de l'u.o. est égal ou supérieur à 5 centièmes de mm. Le nombre de passes est fonc-

tion du but final à atteindre dans les conditions que nous avons vues précédemment. Dans le cas le plus fréquent d'utilisation d'un train, il convient de traiter des zones d'au moins quelques centaines de mètres de longueur, 500 m par exemple. Les zones très courtes, rails isolés en particulier, relèvent du domaine des engins légers ou même portables.

Nous avons vu qu'en ce qui concerne l'usure longue, on ne peut que réduire la profondeur des creux suivant un optimum à déterminer. Par contre, l'usure courte doit être complètement éliminée, et il est même souhaitable d'effectuer une ou deux passes supplémentaires en vue d'ôter la couche affectée par la transformation martensitique et ainsi retarder la réapparition de l'u.o.

Un modèle économique établi par la DB fixe à 0,04 mm le seuil optimal d'intervention, soit 3 passes de meulage. C'est bien approximativement le seuil que s'efforcent d'atteindre — toute considération budgétaire mise à part — les grands réseaux pratiquant le meulage systématique.

6.2. Nombre de passes à exécuter

Dans le cas d'usure courte, et si l'on ne considère que la section longitudinale d'un rail affecté d'usure rigoureusement sinusoïdale, il est aisé de montrer que, si la quantité de métal enlevé à chaque passe est constante, le nombre de passes est proportionnel à la profondeur de l'usure. En fait, ce nombre dépend de toute une série de paramètres : profil d'origine et profil d'usure du rail, dureté superficielle, nuance de l'acier, type de la machine utilisée, de sorte que c'est avant tout une question d'expérience et que ce nombre se définit chaque fois expérimentalement en fonction du résultat final recherché. Toutefois, en vue, en particulier, d'établir une programmation des trains ou engins de meulage utilisés, on peut prendre en compte, pour les trains classiques, la formule suivante :

$$n = p/3 + k$$

Dans cette formule, n représente le nombre de passes, p la profondeur de l'u.o. en centièmes de millimètres, k un coefficient égal à 1,2 ou 3, suivant que le rail est neuf, moyennement ou fortement usé. Cette formule est purement indicative et, en fait, le nombre de pas-

ses croît plus vite que la profondeur, ce qui signifie qu'il est plus économique de meuler lorsque la profondeur est encore faible, quitte à recommencer, que d'attendre une profondeur trop grande, ce qui conduit en outre à des dégâts de la superstructure pouvant se révéler irrémédiables.

En ce qui concerne l'usure longue (travail à meules bloquées), la SNCF a donné dans le cas de rails en bon état, la formule suivante :

$$r = \frac{1{,}4236}{N^{0{,}4426}}$$

dans laquelle N est le nombre de passes meules bloquées et r le pourcentage de défaut résiduel. La fig. 237 représentative de la fonction montre que l'efficacité moyenne maximale est obtenue pour 5 passes et l'abaque de la fig. 238 basée sur la figure précédente, donne le nombre de passes nécessaires en fonction de la profondeur de l'usure initiale et du résultat final escompté. Mais, répétons-le, une telle formule n'a qu'un caractère indicatif et ne saurait être étendue sans discernement à n'importe quel cas de figure.

Ces formules doivent bien entendu prendre en compte le nombre de meules et train utilisés.

6.3. Coût du meulage

Les trains sont la propriété des réseaux ou font l'objet d'une location à l'entreprise, en général à un taux de base journalier, qui incite le réseau à une utilisation optimale en prévoyant des intervalles de travail suffisamment longs, le coût métrique du meulage variant en raison inverse de la durée journalière d'utilisation.

On peut représenter le coût métrique de l'opération par la formule :

$$C = \frac{Q\,(1 + k)\,.\,n}{vh}$$

avec :

C : prix de revient du mètre de meulage.
Q : prix de revient ou prix de location quotidien.
k : coefficient variable lié aux dépenses du réseau.
v : vitesse de meulage.
n : nombre de passes.
h : nombre d'heures de travail effectif par jour.

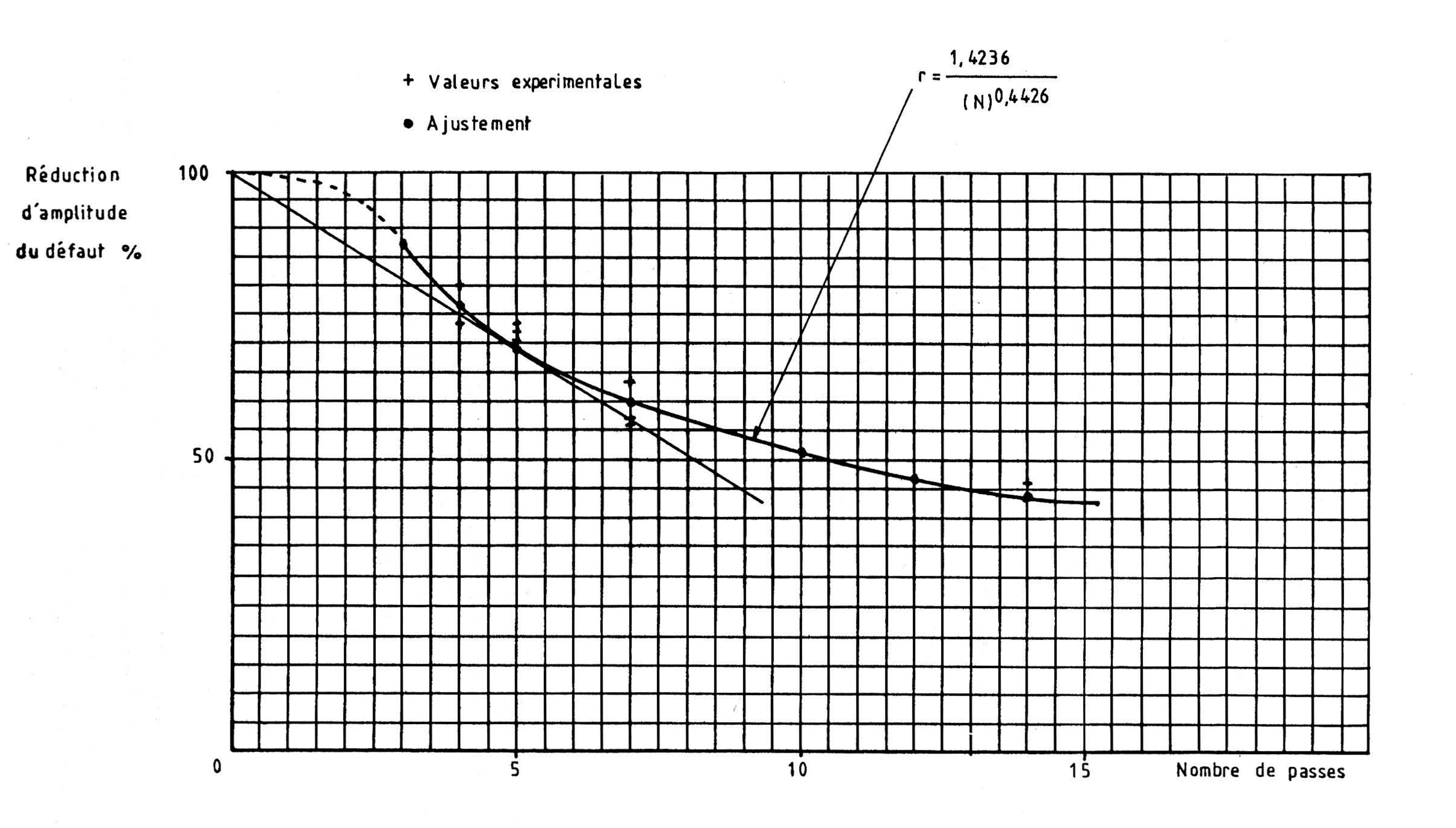


Fig. 237. — *Efficacité du meulage*

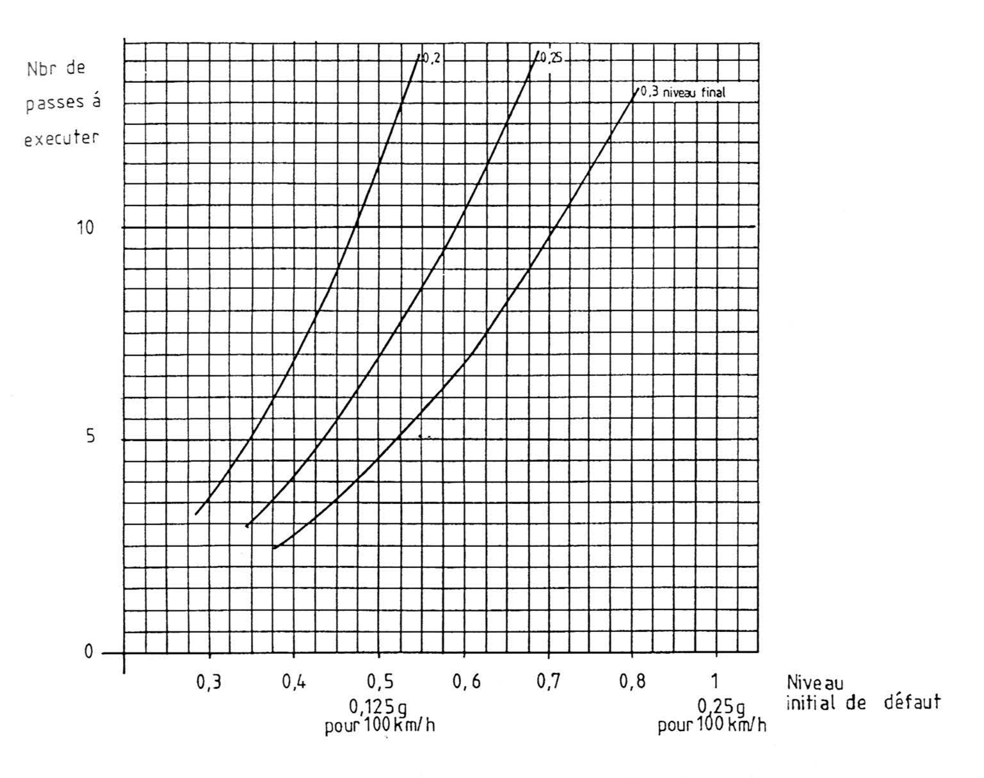


Fig. 238. — *Abaque de calcul du nombre de passes*

Cette formule est schématisée par la fig. 239.

On voit que si h est très faible, le coût devient prohibitif.

Exemple :

Prix de location : FS 10 000.—/j
10 passes et 7 heures : FS 2 040.—/km
20 passes et 1 heure : FS 28 570.—/km.

Au coût de location journalier, les réseaux doivent bien entendu ajouter leurs frais propres : personnel d'accompagnement, de protection, travaux préparatoires éventuels.

En ce qui concerne le train proprement dit (48 meules), le prix de revient 1985 est de l'ordre de FF 1,50 par mètre de passe, pour une durée d'utilisation de 6 h par jour. Ce prix est, nous l'avons vu, inversement proportionnel à la durée d'utilisation (FF 3.- pour 3 heures, FF 4.50 pour 2 heures).

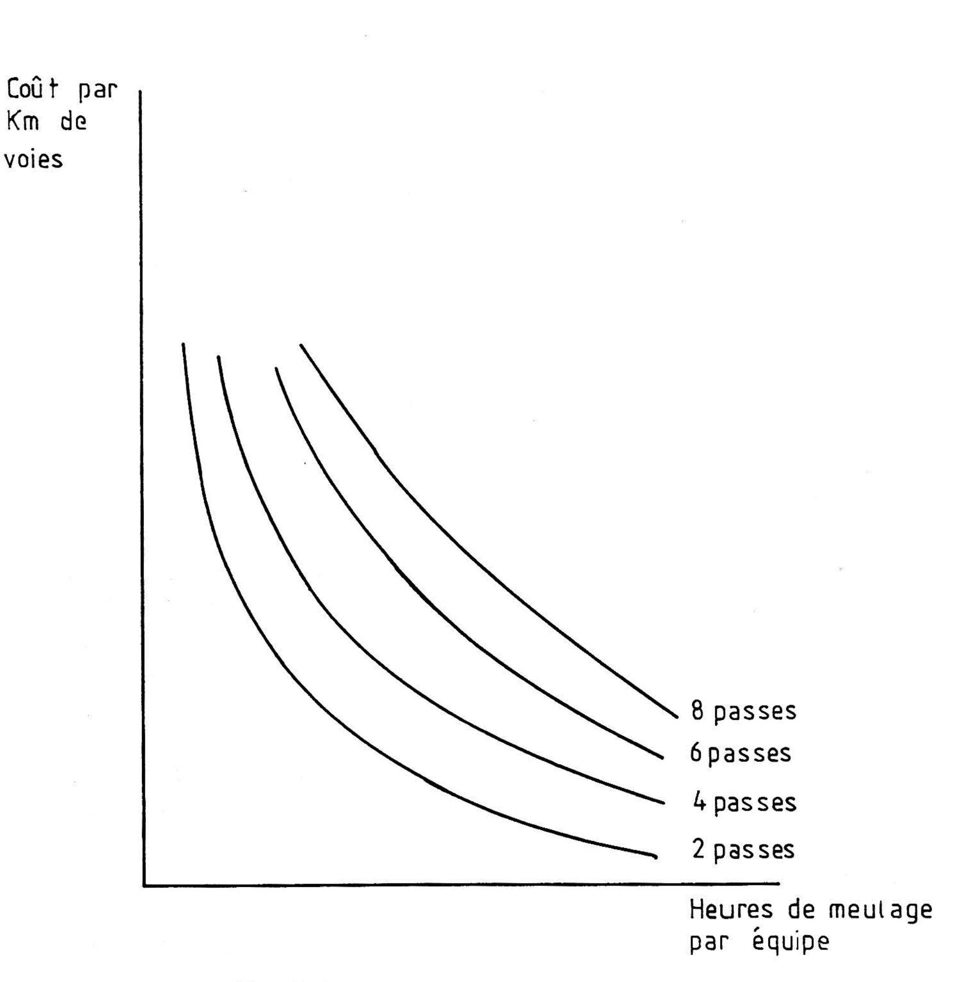


Fig. 239. — *Formule de coût du meulage*

On aboutit ainsi à des prix de revient de l'ordre de FF. 3.- à 6.- pour 10/100 mm, et FF 6.- à 12.- pour 20/100 mm (5). Les dépenses propres au réseau représentent de 10 à 15 % des dépenses de fonctionnement propre du train (amortissement et coût d'exploitation).

(5) Dans les mêmes conditions, le prix d'un mètre de bourrage mécanique est de l'ordre de FF 8.-

7. Rentabilité du meulage

7.1. Nous avons vu que le traitement curatif du rail affecté d'usure ondulatoire est source d'économies, malheureusement le plus souvent très difficiles à appréhender objectivement. Rappelons ces diverses sources d'économies : allongement de la durée de vie du rail, diminution du coût de la maintenance du petit matériel, des traverses et de la géométrie de la voie, diminution des frais de maintenance des matériels moteur et roulant, gain sur la consommation d'énergie motrice, incidence sur l'environnement. Les difficultés d'appréciation proviennent de ce qu'il n'existe qu'un nombre extrêmement restreint de zones test permettant une comparaison objective des situations avec et sans meulage ; mais, il convient également d'ajouter que les caractéristiques des lignes et des circulations prises en compte sont très diverses et que les résultats correspondants varient en conséquence ; c'est ainsi que la littérature américaine et celle qui se rapporte aux réseaux minéraliers lourds concernent essentiellement l'usure en courbes de rayon faible ou moyen, alors que les réseaux européens sont essentiellement intéressés par les problèmes d'usure courte ; enfin, la réduction du bruit dû aux circulations est de première importance, mais son incidence est inchiffrable. Sur les réseaux minéraliers à forte charge par essieu, où les locomotives à bogies à trois essieux couplés sont particulièrement aggressives, le meulage et le reprofilage simultanés ont une incidence importante sur la durée de vie des rails et la consommation d'énergie. Les SJ (Suède) citent un gain de trois ans sur la durée de vie des rails (de 11 à 14 ans), tandis que les SAR (Afrique du Sud) mentionnent une augmentation de 2 à 7 ans ; une étude américaine (25 MMT par an, 30 t par essieu et rail de 66 kg) indique un doublement de durée de vie du rail par meulage (4 à 8 ans). Cette même étude est la seule mentionnant un gain sur les traverses (bois) : augmentation de 13 à 24 ans de la durée de vie grâce au meulage.

En ce qui concerne la dégradation de la géométrie de la voie par u.o., cette même étude estime que le meulage permet de faire passer le cycle d'intervention de 2 à 4 ans, mais il convient de noter que les conditions de maintenance des voies américaines (fortes charges par essieu, tonnages élevés, vitesses faibles), sont sensiblement différentes de celles des voies d'Europe occidentale (20 à 25 t par essieu, vitesses élevées, problèmes de confort et d'environnement). La SNCF, de son côté, a constaté une dégradation de 0,516 mm/MT avec meu-

lage, et de 0,729 mm/MT sans meulage, soit une économie de l'ordre de 37 % sur la maintenance du nivellement. Cette donnée est à rapprocher de la formule que nous avons précédemment mentionnée et qui indique une dégradation de la géométrie de la voie proportionnelle à la puissance 0,8 de la charge par essieu ; on déduit de ces données que les surcharges dynamiques aléatoires dues à l'u.o. courte sont en moyenne de 50 % plus élevées que sur une voie normale, ce qui est en accord avec ce que nous avons indiqué dans le paragraphe consacré aux surcharges causées par l'u.o.

7.2. Un certain nombre d'études ont été menées, particulièrement en Allemagne et aux USA, portant sur des calculs de rentabilité, mais qui ne semblent malheureusement pas être d'une portée générale ; mentionnons toutefois une étude allemande (SCHMIDT) portant essentiellement sur l'usure en courbes, mais qui définit moins un calcul de rentabilité qu'un calcul d'optimisation de l'emploi de trains meuleurs en fonction du programme à exécuter, et des paramètres de la circulation, en fonction du coût d'exploitation du train meuleur. Ce calcul qui concerne essentiellement l'usure en courbe, fait ressortir cependant des rentabilités de meulage comprises entre 6 et 20 %.

En ce qui concerne la rentabilité proprement dite du meulage, seules peuvent être prises en compte les économies qui proviennent de la durée de vie des rails, de la dégradation de la géométrie de la voie et éventuellement de la dégradation du petit matériel ; les facteurs tels que le bruit, le confort, les dépenses d'énergie, la dégradation du matériel, bien que réels, ne peuvent être quantifiés, de sorte que tous les résultats obtenus sont atteints par défaut, le surplus étant à inscrire au bénéfice du meulage.

7.3. L'annexe (8) donne des exemples de calcul correspondant à des cas de figure se rencontrant couramment sur la SNCF : charges de 20 à 25 t par essieu, densité de trafic de 25 000 à 100 000 tonnes par jour, vitesse égale ou supérieure à 140 ou 160 km/h, courbes de rayons supérieurs à 500 m, LRS en profil 60 kg posés sur 1 666 traverses béton (bi-blocs ou éventuellement précontraintes) au km, attaches élastiques Nabla. L'algorithme de calcul qui prend en compte la durée de vie des rails et la dégradation de la géométrie de la voie peut être mutatis mutandis adapté à d'autres cas de figure en fonc-

tion de constatations faites sur le terrain, du coût réel du meulage, du renouvellement et de la maintenance et, enfin, du taux d'actualisation adopté : la rentabilité est, en effet, le résultat de la comparaison entre deux solutions (avec et sans meulage). L'annexe 8 n'a donc guère d'autres prétentions que de donner un modèle de calcul basé sur des hypothèses moyennes d'une voie supportant environ 50 000 t par jour et armée en LRS de 60 kg posés sur traverses en béton. On ne prend en compte que les économies permises par le meulage dans les renouvellements de rails, le petit entretien des autres matériaux de voie et le nivellement. On considère trois hypothèses :

a. *pas de meulage :* les rails sont renouvelés au bout de 16 ans (RR) ; coût du RR (valeur 1984 en FF) : FF 750 000.-/km.
b. *2 meulages à 8 et 16 ans :* le RR est alors repoussé à 25 ans ; coût du meulage : FF 10 000.-/km.
c. *un seul meulage à 12 ans :* le RR se faisant également à 25 ans.

On admet que le meulage entraîne une économie de nivellement de 35 % conforme aux constatations faites et de 5 % sur le petit entretien. Les dépenses d'entretien croissent avec l'âge de la voie ; la SNCF a en particulier établi que les dépenses de nivellement croissaient comme la puissance N/5 de l'âge N de la voie. Si I est le nombre d'interventions annuelles de nivellement, k un coefficient de qualité qui peut être pris égal à 1, on a pour la ligne considérée :

$$I = 0{,}41 + 0{,}08\,(2^{N/5} - 1).$$

Dans un but de simplification du calcul, nous prenons en compte la moyenne des coûts d'entretien sur trois périodes : de 0 à 10 ans, de 10 à 20 ans, et au-dessus de 20 ans. Le calcul est fait en bilan actualisé sur une période de 25 ans, avec des taux d'actualisation variant de 2 en 2 % entre 4 et 18 %.

7.4. Les résultats du calcul montrent que :

— le bénéfice actualisé est toujours très important dans le cas du meulage (le bénéfice est toujours positif quel que soit le taux i). Le taux d'actualisation est donc très supérieur aux taux normalement pratiqués,
— la durée de vie du rail est le facteur ayant le plus d'influence sur le bénéfice actualisé (comparaison de H1 et H1B). La durée de vie du rail est donc le facteur fondamental de gain du meulage,

— la périodicité du meulage ne conduit pas à des différences significatives, surtout si l'on ajoute l'ensemble des bénéfices qui ne sont pas pris en compte dans le calcul. Il vaut donc mieux meuler économiquement, c'est-à-dire dès que l'on observe des creux au moins égaux à 5/100 millimètres.

7.5. Hormis le remplacement prématuré de rails, on peut montrer par un calcul simple la rentabilité du meulage basée sur la seule économie de nivellement en prenant le chiffre SNCF de 37 %. Nous supposerons que le coût de chacune des deux opérations est de 10 FF du mètre. Soit une voie où l'on nivelle annuellement 50 % de parcours, soit un coût de 5 FF du mètre. Le meulage procure une économie annuelle de 5 × 0,37 = 1,85. L'amortissement du meulage sur 10 ans à 10 % est de

$$\frac{0{,}10 \,.\, 1{,}10^{10}}{1{,}10^{10} - 1} = 1{,}62$$

d'où une rentabilité de $\dfrac{1{,}85 - 1{,}62}{1{,}62} \times 100 = 14\ \%$

Certaines zones de la ligne TGV ont été meulées préventivement ; il semble que ce meulage évite plusieurs bourrages et entraîne donc un taux de rentabilité nettement supérieur à 100 %. Ce point fort important concernant les lignes à grande vitesse mériterait d'être précisé.

ANNEXE 6

LE BRUIT FERROVIAIRE

I. Définitions principales concernant le bruit

a) *Unités de mesures physiques*

— On définit la pression acoutisque L_p par :

$$L_p = 20 \log \frac{P}{P_o} \text{ avec } P_o = 2.10^{-5} \text{ Pa}$$

(pression de référence qui correspond à la pression minimale du seuil d'audibilité à 1 000 Hz).

120 dB est le seuil de la douleur.

— Le bruit a une composition spectrale, définie en décibels par bande de fréquence, soit de largeur relative constante en dB/octave ou 1/3 octave, la fréquence haute pour un octave étant double de la fréquence basse, les octaves étant centrées sur :

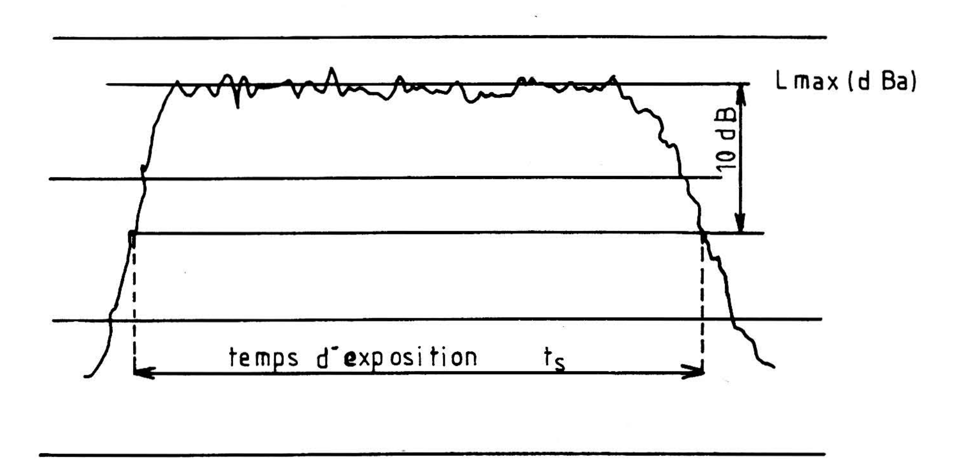
16 - 31^5 - 63 - 125 - 250 - 500 ... Hz.

Lorsque tous les niveaux spectraux sont égaux, il s'agit d'un bruit blanc, mais les niveaux par octave augmentent de 3 dB. Lorsque tous les niveaux par octave sont égaux, il s'agit d'un bruit rose.

Il faut rappeler que réduire l'énergie sonore de moitié, c'est gagner 3 dB, la réduire de 75 %, c'est gagner 6 dB.

b) *Unités de mesures subjectives*

Dans ce cas, on tient compte de la courbe de réponse de l'oreille (fig. 1) en pondérant la mesure physique en fonction de l'intensité et de la composition spectrale du bruit, trois courbes de pondération étant normalisées.



c) *Évaluation de la gêne - Niveau de bruit équivalent en dB (A)*

C'est le niveau de bruit équivalent en dB (A) (Leq) pris pendant l'intervalle 8 h/20 h qui est considéré comme caractérisant le mieux la gêne ressentie par les riverains d'une voie de communication (route, aérodrome, chemin de fer).

Le choix de ce paramètre peut se justifier, en particulier parce qu'il existe entre le Leq et le débit horaire des circulations une relation stable et qu'il existe une bonne corrélation entre le Leq et la gêne moyenne observée chez les riverains.

Cet indice part de l'hypothèse selon laquelle la gêne est proportionnelle à la quantité d'énergie acoustique reçue pendant la période considérée :

$$Leq_{dB(A)} = 10 \log \left[\frac{1}{T} \Sigma_0^T \, 10^{\frac{LdBA}{10}} \, dt \right]$$

Pour un passage horaire de durée totale t_s, temps pendant lequel le niveau sonore est au moins égal à (L_{max} – 10 dB)

$$Leq_{unihoraire} = 10 \log \left[\frac{t_s}{3\,600} \; 10^{\frac{L_{max}}{10}} \right]$$

Le Leq à N_1 train à vitesse V_1 déduit du Leq de N_o train à Vitesse V_1 est donné par la formule :

$$Leq_{(N1V1)} = Leq_{(NoVo)} + 20 \text{ Log } \frac{V_1}{Vo} + 10 \log \frac{N_1}{N_o}$$

II. Particularités du bruit émis par les circulations ferroviaires

- A partir d'une vitesse de 60 km/h environ, c'est le bruit du roulement de la roue sur le rail qui est prépondérant (1).
- Ce bruit est fortement influencé par l'état de surface des roues et des rails,

  jusqu'à + 15 dB(A) pour des rails présentant une usure ondulatoire caractérisée
  et
  jusqu'à + 10 dB(A) suivant l'état de surface de la roue.
- Chaque roue est une source qui émet dans un cône d'axe horizontal et d'angle 60°.

  L'effet d'écran créé par les caisses des véhicules est très important à la verticale des voies.
- Le niveau de bruit est fortement influencé par la vitesse. Il croît suivant une loi en 30 log V soit + 9 dB(A) quand la vitesse double.
- Le niveau de bruit perçu décroît en fonction de la distance à la voie suivant une loi en K log D, K dépendant de la longueur du train.

  Jusqu'à 250 m, on peut admettre que le niveau de bruit, quand la distance double, décroît de 3,5 dB(A) (trains longs de marchandises) à 6 dB(A) (trains courts, autorails).

---

(1) Les autres bruits proviennent des moteurs des attelages, des caisses de véhicules, etc.

- La signature sonore en dB(A), qui est le tracé graphique $L_{dB(A)}$ = f(t), traduit l'impression sonore au point considéré.

  Elle est très caractéristique et très répétitive ; montée du bruit assez rapide, décroissance plus lente et palier d'autant moins fluctuant que l'observateur est plus loin de la voie.

- Le niveau maximal au passage est de l'ordre de

  — 95 dB(A) à 160 km/h pour un train de voyageurs à 25 m de distance.

La fig. 219 montre le gain obtenu par meulage d'u.o.

ANNEXE 7

Fonction de transfert

Soit ℓ la longueur de corde destinée à mesurer les ordonnées de la courbe y (x) (fig. 1). On mesure en réalité la flèche $\delta(x)$ de la corde en son point milieu, soit :

$$\delta(x) = y(x) - \frac{1}{2}\left[y\left(x + \frac{\ell}{2}\right) + y\left(x - \frac{\ell}{2}\right)\right.$$

Si $y(x) = a \sin \frac{2\,\pi n}{\lambda}$ (sinusoïde de longueur d'onde λ)

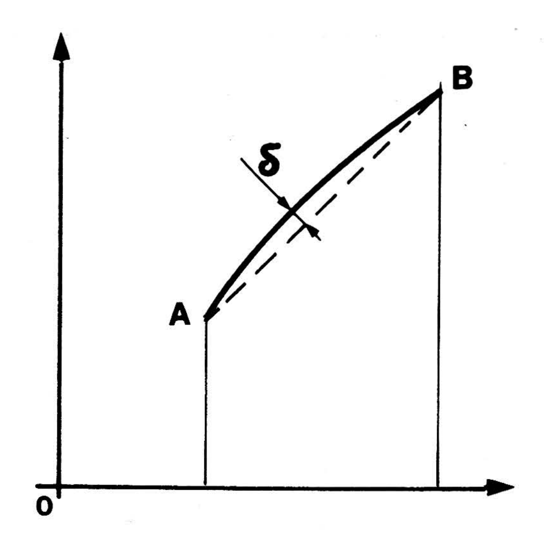
$$\delta(x) = 2 \sin \frac{2\pi n}{\lambda} - \frac{1}{2}\left[a \sin \frac{2\pi}{\lambda}\left(x + \frac{\ell}{2}\right) + a \sin \frac{2\pi}{\lambda}\right.$$

$$\left(x - \frac{\ell}{2}\right) =$$

$$a \sin \frac{2\pi x}{\lambda} - \frac{a}{2}\left[2 \sin \frac{2\pi x}{\lambda} \cos \frac{2\pi\ell}{\lambda}\right]$$

$$\delta(x) = a \sin \frac{2\pi x}{\lambda}\left[1 - \cos \frac{2\pi\ell}{\lambda}\right]$$

$J(\Omega) = 1 - \cos \Omega\ell = 1 - \cos \frac{2\pi\ell}{\lambda}$ est la fonction de transfert permettant de passer de la mesure à la réalité. On constate par ex. que si $\ell = \lambda$, $J(\Omega) = 0$ et les ondes de longueur λ ne sont pas enregistrées.



Si y (x) est quelconque, ce qui est le cas habituel ; il y a intérêt à prendre en compte les transformées de FOURIER.

y (Ω) et F (Ω) les transformées de FOURIER de y (x) et δ (x)

$$Y(\Omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} y e^{-j\Omega x}\, dx$$

$$F(\Omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \delta e^{-j\Omega n}\, dn$$

$$\delta(n) = y(n) - \frac{1}{2}\left[y\left(n + \frac{\ell}{2}\right) + y\left(n - \frac{\ell}{2}\right)\right.$$

Par transformation de FOURIER :

$$F(\Omega) = y(\Omega)\left[1 - \frac{1}{2}\left(e^{\frac{j\Omega\ell}{2}} + e^{\frac{-j\Omega\ell}{2}}\right)\right] = y(\Omega)\,(1 - \cos \Omega\ell)$$

Cette formule est identique à la précédente.

ANNEXE 8

Rentabilité du meulage

1. Hypothèses

a)

H 1	Pas de meulage	Rails renouvelés au bout de 16 ans (RR)
H 1[B]	Pas de meulage	Rails renouvelés au bout de 12 ans
H 2	2 meulages, à 8 et 16 ans	Rails renouvelés à 25 ans
H 3	1 meulage à 12 ans	Rails renouvelés à 25 ans

b) — Coût d'un RR : F 850 000.-/km
— Coût du meulage : de F 15 000.- à 30 000.-/km

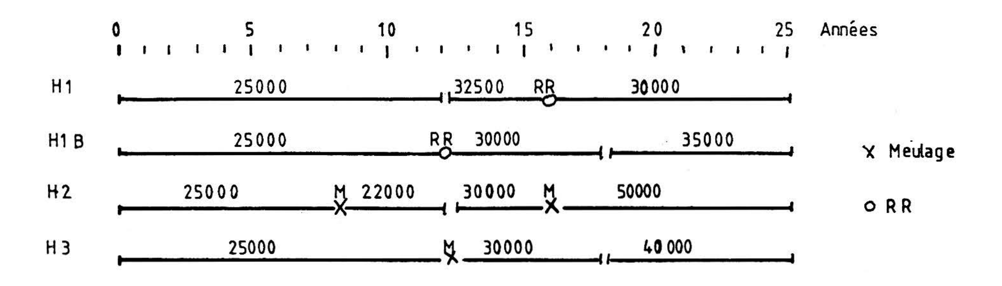
c) — Coût d'entretien

	Age de la voie	0-12 ans	12-18 ans	> 18 ans
Dépenses annuelles	nivellement	5 000.-	8 000.-	12 000.-
	autres	20 000.-	24 500.-	33 000.-
	totales	25 000.-	32 500.-	45 000.-

d) Économies dues au meulage

— 30 % sur le nivellement
— 10 % sur autres.

Le coût d'entretien résultant après lissage est représenté sur le graphique joint.



2. Coûts actualisés sur 25 ans dans l'hypothèse H1

(i est le taux d'actualisation)

Nous désignerons par : (k) l'expression $\dfrac{(1+i)^k - 1}{i\ (1+i)^k}$

a) Coût de l'entretien E_1 :

$$E_1 = 25\,000\,(12) + 32\,500\,[(16).(12)] + 30\,000\,[(25) - (16)]$$
$$= 30\,000\,(25) + 2\,500\,(16) - 7\,500\,(12)$$

b) Coût du renouvellement de rails RR :

$$RR = \frac{850\,000}{(1+i)^{25}}$$

c) Valeur résiduelle à 25 ans, de rails posés à 16 ans :

$$VR = \frac{7}{16} \cdot \frac{500\,000}{(1+i)^{25}}$$

3. Coûts actualisés dans l'hypothèse $H1^B$

a) Coût de l'entretien E_{1B}

$$E_{1B} = 25\,000\,(12) + 30\,000\,[(18) - (12)] + 35\,000\,[(25) - (18)]$$
$$= 35\,000\,(25) - 5\,000\,(18) - 5\,000\,(12)$$

b) Coût du rail RR

$$RR = \frac{850\,000}{(l+i)^{12}}$$

c) Valeur résiduelle

$$VR = 0$$

4. Coûts actualisés dans l'hypothèse H2

a) Coût de l'entretien E_2

$$E_2 = 25\,000\,(8) + 22\,000\,[(12) - (8)] + 30\,000\,[(25) - (12)]$$
$$= 30\,000\,(25) - 8\,000\,(12) + 3\,000\,(8)$$

b) Coût des meulages

$$M_2 = 15\,000\left[\frac{1}{(1+i)^8} + \frac{1}{(1+i)^{15}}\right]$$

c) Valeur résiduelle

$$VR = 0$$

5. Coûts actualisés dans l'hypothèse H3

a) Coût de l'entretien E_3

$$E_3 = 25\,000\,(12) + 30\,000\,[(18) - (12)] + 40\,000\,[(25) - (18)] = 40\,000\,(25) - 10\,000\,(18) - 5\,000\,(12)$$

b) Coût du meulage

$$M_3 = \frac{30\,000}{(l+i)^{12}}$$

c) Valeur résiduelle

VR = 0

6. Résultats

Le résultat des calculs est donné par le tableau suivant en millions de francs.

		4	6	8	10	12	14	16	18
H 1	E_1	427	345	285	241	207	180	158	141
	+ RR	453	334	248	185	138	104	79	60
	− VR	83	51	32	20	13	9	6	3
	Total	797	628	501	406	332	275	231	198
H 1_B	E_{1B}	436	351	288	242	207	180	158	141
	+ RR	530	423	338	271	219	177	143	117
	Total	966	774	626	513	426	357	301	258
H 2	E_2	413	335	276	234	201	175	154	138
	+ M_2	18	15	12	11	9	8	6	4
	Total	431	350	288	245	210	183	160	142
H 3	E_3	451	361	295	247	210	183	160	143
	+ M_3	18	14	12	10	8	7	6	4
	Total	469	375	307	257	218	190	166	147
H 1_B − H 1	....	169	146	125	107	94	82	70	60
H 1 − H 2	....	366	278	213	161	122	92	71	56
H 3 − H2	....	38	25	19	12	8	7	6	5
H 1 − H 3	....	328	293	194	149	114	85	65	51

TABLEAU 31

	Rail gauche	**Rail droit**
119.6	4 5 1 0	★ 8 0
119.8	2 3 3 1 1	★ 2 5 2 0
120.0	9 1	★ 5 4 2
120.2	9 1	★ 1 3 2 3 0

120.4	6 4	★ 3 1 1 3 3 0
120.6	9	★ 8 2 0
120.8	9 1	★ 4 2 2 1 1
121.0	7 1	★ 5 3 1
121.2	2	★ 3
121.4	2 1 0	★ 0
121.6	3 4 2 0 0	★ 0
121.8	2 1 2 2 1	★ 2
122.0	1 1 0	★ 1
122.2	9 0	★ 9 0 0
122.4	X	★ 7 2 0
122.6	9 1	★ 6 3
122.8	9 1	★ 5 5
123.0	9 0	★ 9 1
123.2	5 5	★ 2 7 2
123.4	3 6 1	★ 3 6 1
123.6	3 7	★ 3 6 0
123.8	5 5	★ 1 6 2 1
124.0	6 4	★ 2 6 2
124.2	3 6 1 0	★ 3 5 1 0
124.4	4 5 1	★ 3 6 1
124.6	3 6	★ 6 3 1
124.8	5 5 0	★ 0 4 5 1 0
125.0	0 6 3	★ 1 3 6
125.2	0 5 3 1 1	★ 2 8
125.4	3 4 1	★ 2 5 1
125.6	6	★ 5 0
125.8	8 2	★ 8 1
126.0	3 5 1 1	★ 2 2 2 2 2
126.2	3 5 2	★ 0 5 4
126.4	0 8 2	★ 0 6 3
126.6	4 5 1	★ 2 6 2
126.8	1 2 1	★ 0 2 0 1 0

TABLEAU 32

KM = 116.6		★							KM = 117.6	1	★★★★★
KM = 117.6				★					KM = 118.4	0.8	★★★★
KM = 118.4					★				KM = 119.2	0.8	★★★★
KM = 119.2			★						KM = 119.4	0.2	★
KM = 119.4				★					KM = 119.6	0.2	★
KM = 119.6					★				KM = 120	0.4	★★
KM = 120						★			KM = 120.6	0.6	★★★
KM = 120.6					★				KM = 121	0.4	★★
KM = 121	★								KM = 121.2	0.2	★
KM = 121.2			★						KM = 121.4	0.2	★
KM = 121.4					★				KM = 122	0.6	★★★
KM = 122			★						KM = 122.6	0.6	★★★
KM = 122.6		★							KM = 123	0.4	★★
KM = 123			★						KM = 123.6	0.6	★★★
KM = 123.6				★					KM = 124.4	0.8	★★★★
KM = 124.4			★						KM = 124.6	0.2	★
KM = 124.6					★				KM = 125.4	0.8	★★★★
KM = 125.4		★							KM = 125.8	0.4	★★
KM = 125.8					★				KM = 126.2	0.4	★★
KM = 126.2			★						KM = 126.6	0.4	★★
KM = 126.6					★				KM = 127	0.4	★★
KM = 127		★							KM = 127.2	0.2	★
KM = 127.2			★						KM = 127.6	0.4	★★
KM = 127.6				★					KM = 128	0.4	★★
KM = 128	★								KM = 128.4	0.4	★★
KM = 128.4					★				KM = 129	0.6	★★★
KM = 129.2				★					KM = 129.6	0.4	★★
KM = 129.6		★							KM = 129.8	0.2	★
KM = 129.8			★						KM = 130.4	0.6	★★★
KM = 130.4				★					KM = 130.6	.0.2	★
KM = 130.6					★				KM = 131	0.4	★★
KM = 131			★						KM = 131.4	0.4	★★
% DISTRIB.	4	15	25	19	33	4	0	0	TOTAL KM = 14.6		

RÉSUMÉ DU CHAPITRE 9

Parmi les défauts dont sont affectés les rails en voie, l'un deux, l'usure ondulatoire (uo) joue un rôle très particulier par ses caractéristiques et ses conséquences. Il se présente sous forme d'ondulations dans le plan vertical, assez régulièrement espacées et dont on peut distinguer trois catégories différentes : l'usure courte (corrugation) de quelques centimètres de longueur d'onde et d'amplitude pouvant atteindre 20 à 30 centièmes de mm ; l'usure moyenne de quelques dizaines de cm de longueur d'onde, surtout présente en courbe de faible rayon et l'usure longue atteignant 1,70 m de longueur d'onde et quelques dixièmes de mm de profondeur. L'origine de ce défaut et en particulier de l'usure courte n'est pas encore clairement établie. Elle provient très probablement pour cette dernière de phénomènes de résonance entre éléments au contact (bandages, voiles de roues, essieu et rail). L'uo moyenne est provoquée par les phénomènes de glissement dans les courbes du fait des différences de parcours des deux roues d'un même essieu. Quant à l'uo longue, elle résulte des galets de dressage en usine lors de la fabrication du rail.

L'usure courte provoque la formation de martensite à la surface du champignon. Mais si dans l'ensemble, les uo de toute nature ne présentent aucun caractère de gravité au point de vue sécurité du transport, elles entraînent une augmentation très importante des coûts de maintenance de la voie et du matériel roulant du fait des vibrations qu'elles induisent et d'importantes nuisances (bruit) sur l'environnement. Les spectres de défauts mettent l'uo en évidence et permettent d'en mesurer les conséquences.

Aucun moyen préventif ne permettant à l'heure actuelle d'éliminer a priori l'uo, il convient de la traiter par le moyen curatif du meulage en voie. On a conçu à cet effet des véhicules isolés et des trains de meulage plus ou moins sophistiqués (type Speno) utilisant des meules à patin fixe ou oscillant ou de préférence des meules rotatives à axe vertical ou inclinable qui permettent non seulement l'élimination de l'uo mais également d'assurer un véritable reprofilage du champignon du rail. Les meules peuvent être bloquées ou non sur leur berceau, afin de traiter indifféremment les ondes de n'importe quelle longueur. Les trains les plus importants comportent 128 meules.

Les programmes de meulage sont établis à l'aide des graphiques d'enregistrement tracés par les véhicules ad hoc qui fournissent longueur d'onde et amplitude.

La rentabilité du meulage en voie est très rapidement établie par les seules économies portant sur les consommations de rails et le nivellement de la voie, économies auxquelles il convient d'ajouter celles difficilement chiffrables de maintenance de la voie et du matériel roulant, les économies de combustible de traction et enfin la suppression presque totale des nuisances. Le prix de revient est très sensible aux intervalles dont disposent les trains pour travailler et il apparaît intéressant d'intervenir dès que la profondeur des ondes atteint 5/100 de mm.

10 MAINTENANCE

1. Principes généraux de la maintenance

1.1. Dans tous les domaines, la maintenance et les conditions dans lesquelles elle est assurée sont des éléments essentiels de diminution du coût global d'exploitation. Le rail n'échappe pas à la règle et compte tenu des immobilisations considérables qu'il représente dans un réseau, il est fondamental que son entretien fasse l'objet de soins constants et donne lieu à l'établissement et au suivi de règles extrêmement rigoureuses.

1.2. On distingue deux types de maintenances nettement différentes l'une de l'autre : la maintenance préventive et la maintenance curative. Dans la première, on définit et on applique un certain nombre de règles aussi précises que possible ayant pour but de maintenir en permanence les installations ou le matériel considéré dans un état aussi voisin que possible de l'état neuf. Cette maintenance a donc pour conséquence évidente de prévenir en temps utile toutes les avaries susceptibles de se produire, ce qui est particulièrement important dans le cas du rail comme nous l'ont montré les chapitres consacrés aux défauts des rails et au contrôle non destructif.

La maintenance curative consiste tout simplement à réparer les dégâts survenant au cours de la vie d'un matériel, par exemple, pour un rail,

les fissures et les ruptures. Ce type de maintenance varie bien entendu en raison inverse de la maintenance préventive qui a précisément pour but de limiter le nombre de défaillances survenant inopinément.

1.3. La maintenance préventive est basée sur le principe de révisions cycliques. Pour la voie, on a tout d'abord appliqué il y a un siècle la méthode dite de "révision générale" qui consistait en une remise en état complète et systématique d'un tronçon de voie déterminé. Coûteuse et d'une efficacité médiocre, cette méthode a été remplacée une cinquantaine d'années plus tard par le double système de la révision intégrale et de la révision réduite qui distinguait le matériel (rails, traverses, joints, etc.) remis en état tout au moins sur les lignes importantes, par quart à intervalle de quatre ans et la géométrie de la voie (nivellement, dressage) traitée sur la base d'un programme annuel en fonction des besoins. Le développement des moyens de mesure et de traitement de la géométrie de la voie ont permis plus récemment de donner une plus grande souplesse à la révision réduite et à adapter en permanence le programme aux besoins et à l'évolution réelle de l'état de la voie. La révision intégrale a elle-même évolué ; en effet, les besoins réels de révision sont fonction à la fois de la nature du matériel et de son âge : on a bien vu par exemple que l'âge des rails, par considération de la loi de WEIBULL joue un grand rôle dans le développement des défauts du rail. C'est pourquoi depuis quelques années, la SNCF a établi pour chaque groupe de lignes, en fonction du trafic annuel global, un programme d'entretien cyclique qui est double fonction du type de matériel et de son âge. C'est dans le cadre de ce type de révision qu'est traitée la maintenance du rail que nous allons maintenant aborder.

1.4. Par ailleurs, il ne faut pas négliger l'aspect économique de la maintenance dont le niveau de dépenses doit rester en harmonie avec le but à poursuivre ; en particulier, tout travail inutile ou peu rentable doit être absolument prohibé. Deux remarques nous permettront d'illustrer ce principe :

— le vieillissement des traverses est essentiellement fonction de leur âge et très peu dépendant du trafic ; or, pour le rail, c'est l'inverse. Il est donc économiquement justifié de distinguer, comme nous

venons de le voir, des cycles de révision différents suivant la nature du composant de la voie considéré.

— sur la plupart des réseaux, les lignes à trafic important ou à grande vitesse font l'objet de renouvellements totaux ou partiels systématiques dont la programmation doit se faire pour un certain nombre de raisons évidentes plusieurs années à l'avance. Il est alors indispensable de tenir compte de la prévision de renouvellement dans les quelques exercices qui le précèdent afin de limiter les travaux de maintenance correspondant au strict minimum compatible avec la sécurité.

Nous ajouterons enfin que dans un but d'économie, il est intéressant de faire précéder l'exécution des travaux de maintenance, par exemple l'année précédente, d'une prospection, par sondages permettant une meilleure planification et organisation de l'ensemble des travaux envisagés.

2. Maintenance préventive du rail

2.1. On peut affirmer que la maintenance préventive du rail doit en fait commencer dès sa sortie d'usine : le rail subit en effet de nombreuses manutentions lors du stockage et déstockage en usine, à l'occasion du transport vers le centre de soudage, tout au long de la chaîne de soudage, lors du déchargement en voie et enfin au cours de la pose proprement dite. Toutes ces opérations, effectuées sans précaution, sont sources de blessures qui peuvent être à l'origine de ruptures graves et de rails faussés qui en LRS constituent toujours un danger surtout pendant les périodes de fortes chaleurs : il est fâcheux de constater parfois un stockage en vrac ou la frappe de rails en cours de pose avec des masses métalliques. On ne saurait donc trop organiser les emplacements de stockage et n'utiliser qu'un appareillage de manutention et de mise en place spécialement étudié pour éviter les blessures. Enfin, les trains de pose et renouvellement comportent des éléments qui déforment les rails (dégarnisseuses, wagons de pose) : la conception de ces engins doit être telle qu'elle n'introduise dans le rail que des contraintes modérées restant largement dans le domaine élastique.

2.2. Comme les autres composants de la voie, le rail doit faire l'objet de toute une série d'interventions de caractère cyclique que nous allons rapidement passer en revue.

2.2.1. Les tournées de contrôle effectuées à pied font partie de la maintenance préventive. Il ne saurait bien entendu être question de définir des règles a priori de périodicité, car la fréquence de ces tournées est fonction de toute une série de facteurs (âge et caractéristiques des rails, densité du trafic, charge par essieu, conditions de pose, etc.) que seuls les spécialistes responsables du réseau peuvent apprécier. Ces tournées, assez coûteuses, revêtent un caractère relativement superficiel en ne permettant de constater que les anomalies flagrantes, dont les plus importantes sont en général détectées par ailleurs : c'est ainsi, par exemple, que sur les réseaux modernes, toute rupture de rail est instantanément décelée par les circuits de voie et par conséquent par la signalisation. Par contre, l'aspect et la tenue des joints, les blessures, les empreintes de patinage sont souvent du ressort des tournées. Il est donc indispensable de compléter ces tournées d'ensemble, en principe une fois par an sur les lignes à fort trafic ou à grande vitesse par une tournée de détail uniquement consacrée aux rails ; cette tournée vise spécialement l'aspect général de la table de roulement, les éventuels encochages du patin ou blessures, les congés âme-champignon et âme-patin, si nécessaire avec l'aide d'un miroir, et l'aspect général des joints. Ceux-ci peuvent également faire l'objet d'un sondage au marteau, un son clair et un rebondissement régulier de l'outil traduisant l'absence de fissurations graves dans la portée d'éclissage qui, sans démontage, échappe à toute observation visuelle directe. Un contrôle non destructif à l'aide d'un appareillage ultra-sonore portable (type Minix) est cependant plus efficace. On comprend facilement que l'intérêt de ces tournées, avec toutes les insuffisances qu'elles peuvent comporter, varie en sens inverse de la qualité et de la fiabilité des contrôles non destructifs que peuvent pratiquer les réseaux : il est évident que, en particulier dans des régions à caractère géographique ou climatique difficile, l'un puisse se substituer totalement aux autres.

2.2.2. Le joint

2.2.2.1. Les joints dont le nombre est fort heureusement en régression constante, sont les points du rail les plus sensibles et aussi les

plus coûteux d'entretien. Un compromis de périodicité doit être trouvé entre un examen superficiel facile à exécuter, mais de portée très limitée et un examen visuel complet qui nécessite le démontage des éclisses : un contrôle non destructif systématique avec équipement adapté pour découvrir l'ensemble des défauts d'abouts (en particulier fissurations au congé âme-champignon et fissurations de trous d'éclissage) peut influencer la périodicité des examens visuels.

L'observation du joint monté porte d'une part sur l'usure des abouts de rails, les désaffleurements, l'état de la surface de roulement, l'existence de bavures de métal, le déséquerrage éventuel et d'autre part sur tout ce qui concerne l'éclisse : usure, encastrement, état de serrage des boulons, etc. Cette observation comme nous l'avons vu, peut être complétée par un sondage au marteau ou par des appareillages ultra-sonores portables.

2.2.2.2. Le démontage des éclisses permet un examen beaucoup plus approfondi complétant le précédent sur deux points essentiels :

- recherche systématique des fissurations de toutes sortes. Cette recherche nécessite un nettoyage préalable soigné à la brosse métallique et des examens par ressuage au pétrole qui peuvent mettre en évidence des amorces de fissures pratiquement invisibles à l'œil nu
- remplacement des éclisses usées par des éclisses rematricées (fig. 240) qui permettent également de rattraper l'usure des por-

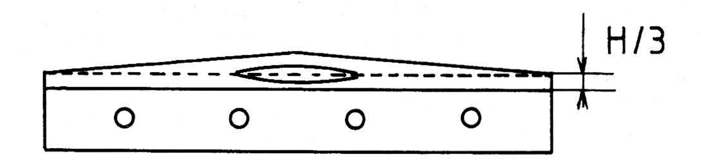


Fig. 240. — *Eclisse rematricée*

tées d'éclissage. On peut également compenser ces usures par des cales métalliques (type fourrures SHIM) (fig. 241) mais de durée moindre ; des gabarits spéciaux (fig. 242) permettent de mesurer l'usure avec une bonne précision, en vue de sa compensation. Il ne faut toutefois pas oublier que l'emploi d'éclisses rematricées ou de fourrures trop fortes ou un serrage excessif des bou-

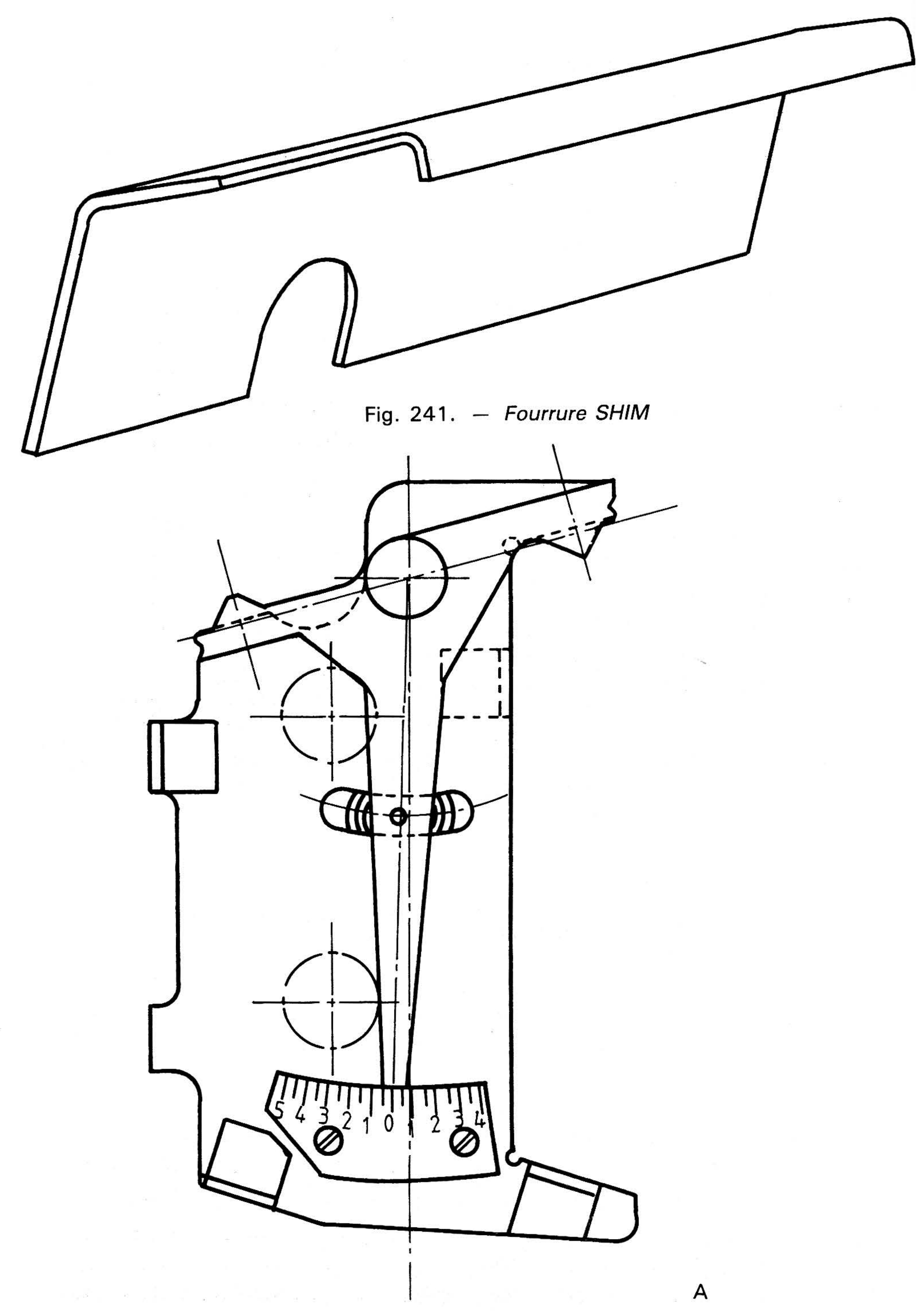
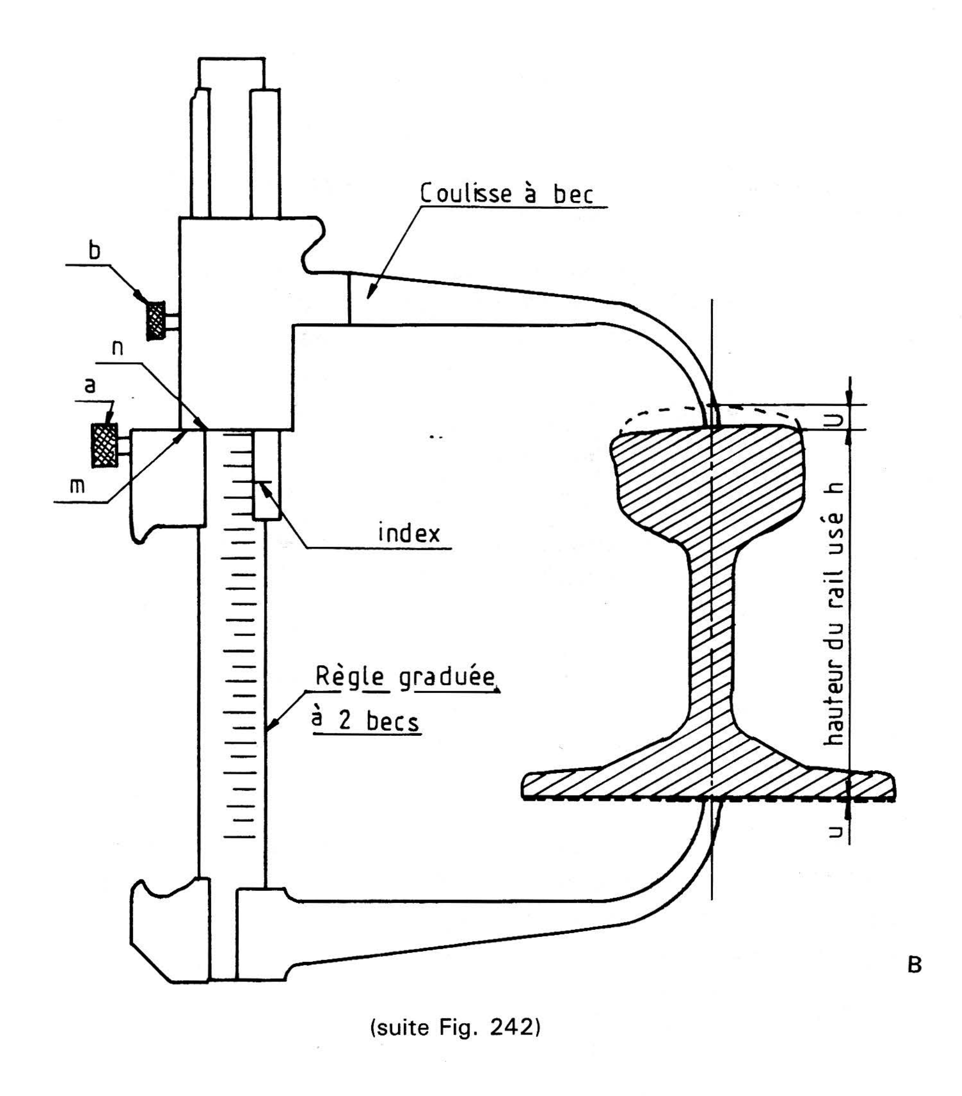


Fig. 241. — *Fourrure SHIM*

Fig. 242 A/B. — *Gabarit de mesure d'usure*



(suite Fig. 242)

lons peuvent entraîner de graves fissurations au congé de raccordement âme-champignon et par la suite un décollement du champignon.

Avant remontage, le joint doit être convenablement graissé (boulons, portées d'éclissage). Un autre type de graissage peut intervenir plus fréquemment, sans démontage du joint, par simple desserrage des boulons, à l'aide d'une seringue à bec plat, ou mieux d'un groupe de

graissage à pulvérisation par pression (fig. 243). N'oublions pas que le démontage des joints s'opérant en période d'exploitation de la ligne,

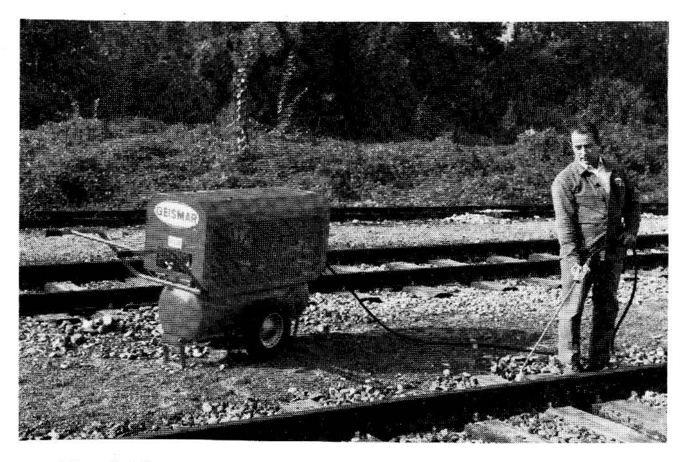


Fig. 243. — *Groupe de graissage à pulvérisation*

les équipes au travail doivent être munies de boulons spéciaux (boulons-clavettes ou boulons à came) (fig. 244) permettant d'assurer très rapidement un serrage suffisant des éclisses à l'occasion du passage inopiné d'une circulation ferroviaire.

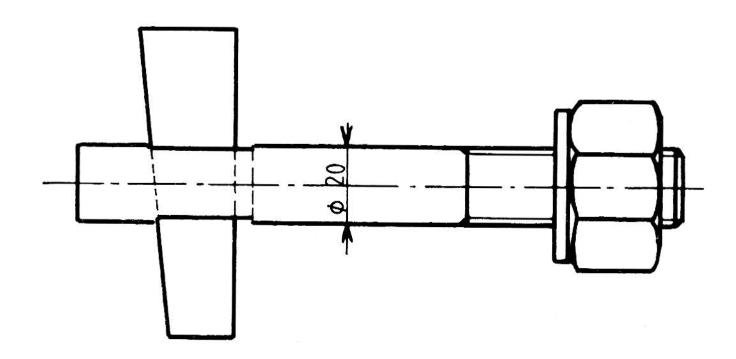


Fig. 244. — *Boulon-clavette*

Nous ne nous étendrons pas sur le problème de l'ouverture des joints qui peut faire l'objet de règles sensiblement différentes en fonction des variations de température très diverses d'un réseau à un autre. Il est cependant nécessaire qu'une vérification systématique soit opérée, en principe au printemps, les relevés d'ouvertures obtenus servant dans une zone déterminée, à déclencher, en cas de nécessité une opération de ''tirage de fer'' pour régulariser les ouvertures en fonction des règles locales. En outre, en été, pendant les périodes de températures élevées des tournées spéciales sont indispensables pour détecter toute anomalie susceptible d'entraîner un incident tant sur voies sans joints que sur voies avec joints. Il ne faut pas oublier que les coupes biaises de rails sont très dangereuses, les patins de deux rails contigus risquant de venir en contact, alors qu'une ouverture apparemment satisfaisante se manifeste au niveau du champignon.

2.2.2.3. Si l'on ajoute à tout ceci les usures systématiques de matériel roulant et les graves défauts de nivellement que le joint entraîne, on comprend que les réseaux estiment que son coût représente 30 à 50 % des dépenses globales de maintenance de la voie et en concluent à l'intérêt financier qui découle de la pose en LRS.

2.2.3. La pleine barre

2.2.3.1. La maintenance préventive est beaucoup plus simple que celle du joint : si l'on excepte la recherche des défauts qui doit normalement donner lieu à un contrôle non destructif systématique, l'entretien préventif se borne, dans certains cas où des écoulements de métal trop importants se produisent à un ébavurage mécanique à l'aide d'une machine spéciale, tout au moins si les bavures mettent en cause soit le dressage soit l'écartement. Les bavures doivent être systématiquement éliminées dans les zones de triage où l'on utilise des sabots-cales.

2.2.3.2. La maintenance préventive doit être complétée dans certaines zones particulières (courbes de faible rayon, zone de corrosion en tunnel) par des mesures d'usure verticale ou transversale (ou d'épaisseur d'âme) à l'aide de gabarits ad hoc, le contrôle non destructif pouvant d'ailleurs concourir à certaines de ces mesures. Rappelons enfin pour mémoire le meulage de l'usure ondulatoire largement traité dans le chapitre précédent. En fait, l'élément fondamen-

tal de la maintenance préventive de la pleine barre est le contrôle continu non destructif que nous avons longuement évoqué au chapitre VIII et qui permet en général un traitement programmé des défauts avant qu'ils ne dégénèrent en ruptures.

3. La maintenance curative

3.1. La maintenance curative a pour objet le traitement de toutes les anomalies, immédiat dans le cas de ruptures, à terme plus ou moins rapproché dans celui des fissures susceptibles d'évoluer en ruptures ou des défauts néfastes à la tenue géométrique de la voie. L'ensemble de ces défauts, fissures ou ruptures, est repéré, nous l'avons vu, soit par un examen visuel, soit plus généralement par le contrôle non destructif.

3.2. Dès leur découverte, les défauts doivent faire l'objet d'une classification suivant leur caractère de gravité et le risque qu'ils représentent, car il est économiquement nécessaire d'adapter la date de remplacement ou de réparation du rail à la nature du défaut, son importance et son évolution prévisible. En outre, chaque fois que possible, il est économiquement souhaitable de regrouper les opérations de maintenance en chantiers organisés et ce d'autant plus que la mécanisation de ce type d'intervention se développe. A titre d'exemple, mentionnons le classement SNCF en trois catégories : O, X et S.

On classe en catégorie O les rails ne nécessitant qu'une simple mise en observation. Il s'agit essentiellement de défauts superficiels peu accentués et bien localisés, susceptibles d'une évolution lente ou nulle, voire même de disparition sous l'action du passage des circulations. Ces défauts font simplement l'objet d'un examen particulier lors des tournées à pied systématiques. A l'opposé figurent les rails rompus ou fissurés de façon telle qu'ils ne permettent pas le passage des circulations, tout au moins à vitesse normale (catégorie S). De tels défauts doivent faire l'objet soit d'une réparation immédiate (remplacement d'un coupon de rail) soit d'une consolidation provisoire, par exemple par éclissage permettant le passage des circulations à vitesse réduite ou normale suivant le type de travail effectué.

La catégorie X inclut les autres types de défauts, peu dangereux dans l'immédiat et à évolution suffisamment lente pour permettre de différer la réparation (ou le remplacement du rail). Un classement en sous-catégorie X_2 et X_1 suivant l'unicité ou la multiplicité des défauts définit des délais de remplacement ou réparation de 10 jours ou 3 mois, ce qui, dans ce dernier cas, permet un chantier organisé.

Le classement en fonction du défaut est de la responsabilité de l'échelon local de commandement ; il est assez complexe, car il doit tenir compte de la nature du défaut, de son importance, son unicité ou sa multiplicité, sa position dans la barre. Il appartient en fait à chaque réseau de définir, en fonction des caractéristiques propres de son infrastructure et de son trafic, des règles aussi précises que possible qui leur soient adaptées. On peut également concevoir qu'un préclassement soit effectué a priori par l'ordinateur de bord de la voiture d'auscultation, suivant un algorithme préétabli en fonction des caractéristiques de chaque défaut. Il est enfin nécessaire que chaque agent découvrant une anomalie connaisse sans ambiguïté la conduite à tenir vis-à-vis des circulations : ce peut être le cas d'un agent de la voie, mais c'est aussi souvent un agent de la signalisation qui découvre une rupture par anomalie de fonctionnement d'un circuit de voie. Dans le même ordre d'idées, il est souhaitable que tout agent de conduite constatant un patinage important sur sa locomotive en fasse part le plus rapidement possible en vue d'un examen rapide du rail incriminé. C'est donc tout un ensemble de règles strictes que doit prévoir chaque réseau à l'usage des agents intéressés.

3.3. Chaque défaut détecté et classé suivant les errements du réseau doit faire l'objet :

— d'une marque à la peinture permettant un repérage facile

— d'une fiche devant figurer dans un dossier des rails avariés.

Tout rail remplacé ou réparé fait l'objet d'une fiche de retrait pour permettre l'établissement des statistiques (cf. chap. 7).

3.4. Réparations

3.4.1. Nous n'entrerons pas dans le détail des mesures de consolidation ou de réparations à prendre qui peuvent être fort complexes

et sortent du cadre de cet ouvrage. Il convient cependant de mentionner l'attention toute particulière qui doit être apportée au maintien de la stabilité transversale d'un LRS après une rupture, surtout par temps froid, la réparation conduisant en général à l'introduction en voie d'un coupon : la règle de base est, à température ambiante inchangée, de remplacer une longueur déterminée de rail (coupon de 4 m par exemple) par une longueur absolument identique de rail neuf, compte tenu bien sûr de la valeur des intercalaires de soudure. Les lacunes subsistantes sont comblées soit par réchauffage, soit par traction des portions de LRS contiguës. L'opération est complétée par une libération partielle sur une cinquantaine de mètres de part et d'autre.

3.4.2. Dans ces conditions, les mesures provisoires possibles sont les suivantes :

- Consolidation provisoire. On place les deux morceaux de la partie rompue sur une traverse éventuellement déplacée ou sur un blochet en bois.
- Consolidation par éclissage sans perçage. On réunit les deux extrémités par une éclisse maintenue par des çés de serrage. En LRS, l'importance de la lacune conditionne la vitesse limite de franchissement.
- Réparation provisoire. On substitue à la partie avariée un coupon de rail d'au moins 4 m de longueur maintenu à ses extrémités aux rails adjacents par éclissage.

3.4.3. La réparation définitive peut s'opérer

- si l'aspect du défaut le permet par une soudure aluminothermique large, solution la plus économique
- sinon par substitution définitive d'un rail élémentaire ou d'un coupon. La substitution complète du rail s'impose dans le cas de fabrications anciennes pouvant être affectées de taches ovales multiples (dues à l'alignement en chapelet d'inclusions non métalliques). Sinon un coupon suffit, sous réserve de la prise, dans tous les cas, de mesures nécessaires susvisées pour assurer la stabilité transversale.

3.5. Réparation par rechargements

3.5.1. Outre l'élimination des fissures graves ou ruptures que nous venons de traiter, la maintenance curative comporte la réparation par rechargement des défauts superficiels. Ce type de réparation doit être très limité, sinon abandonné, pour des raisons économiques évidentes, dans les quelques années qui précèdent le renouvellement de la voie ou des rails.

Dans certains cas, on peut procéder à de tels rechargements par aluminothermie, mais c'est le procédé par soudure à l'arc électrique qui est à l'heure actuelle systématiquement utilisé par la plupart des réseaux. Ce mode de rechargement concerne soit les abouts de rails usés, voire fissurés ou écaillés par le choc répété des roues, soit en pleine barre des défauts de surface dus à l'utilisation : empreintes de patinage ou empreintes de poinçonnage périodiques dues à des corps étrangers durs incrustés dans un bandage.

3.5.2. Mode opératoire

3.5.2.1. Le rechargement d'abouts est une opération relativement simple n'intéressant a priori que des joints métallurgiquement sains et réclamant simplement une mise à niveau géométrique préalable du joint (remplacement d'éclisses, serrage de boulons, nivellement). Il est néanmoins souhaitable de ne pas allonger exagérément la longueur du rechargement pour éviter la zone de flexion alternée et de ne pas dépasser la position du trou d'éclissage le plus proche de l'about. Néanmoins, les premiers rechargements effectués sans précaution particulière il y a une trentaine d'années ont entraîné de multiples déboires (écaillage, fissuration). C'est pourquoi, il est nécessaire d'appliquer une procédure bien déterminée.

3.5.2.2. Nous avons vu précédemment que tout processus de soudure appliqué sur un acier dur tel que l'acier à rails ne pouvait être mené qu'avec un grand luxe de précautions, en vue d'éviter des phénomènes localisés de trempe dûs à une vitesse critique très faible et qui conduisent inéluctablement à des microfissurations dégénérant plus ou moins rapidement en ruptures. Ceci est particulièrement vrai dans le domaine des rechargements à l'arc effectués par nature sur le tas et où par conséquent tant les conditions de contrôle que les conditions d'exécution donnent toujours lieu à des difficultés du fait

de la météorologie, de l'isolement des exécutants et du passage des circulations, plus particulièrement sur les lignes à fort trafic qui sont précisément celles où ce genre de travaux est le plus généralement exécuté.

Nous décrirons plus longuement le processus de rechargement des empreintes de patinage ou de poinçonnage périodiques qui du fait de l'existence très fréquente de fissures sous-jacentes présente le maximum de difficultés (1).

L'aspect général du défaut est le principal élément de décision en vue d'entreprendre le travail, car il est évident qu'un défaut dont la surface est importante rendra a priori nécessaire l'enlèvement d'un trop grand volume de métal pour que l'opération soit techniquement et économiquement justifiée. C'est pourquoi il est souhaitable de n'entreprendre que le rechargement d'empreintes relativement récentes, peu évoluées dont les fissures sous-jacentes n'atteignent pas encore 10 mm de profondeur.

Il est tout d'abord essentiel de procéder à un curetage soigné de la partie à recharger (fig. 245) de façon à être certain non seulement

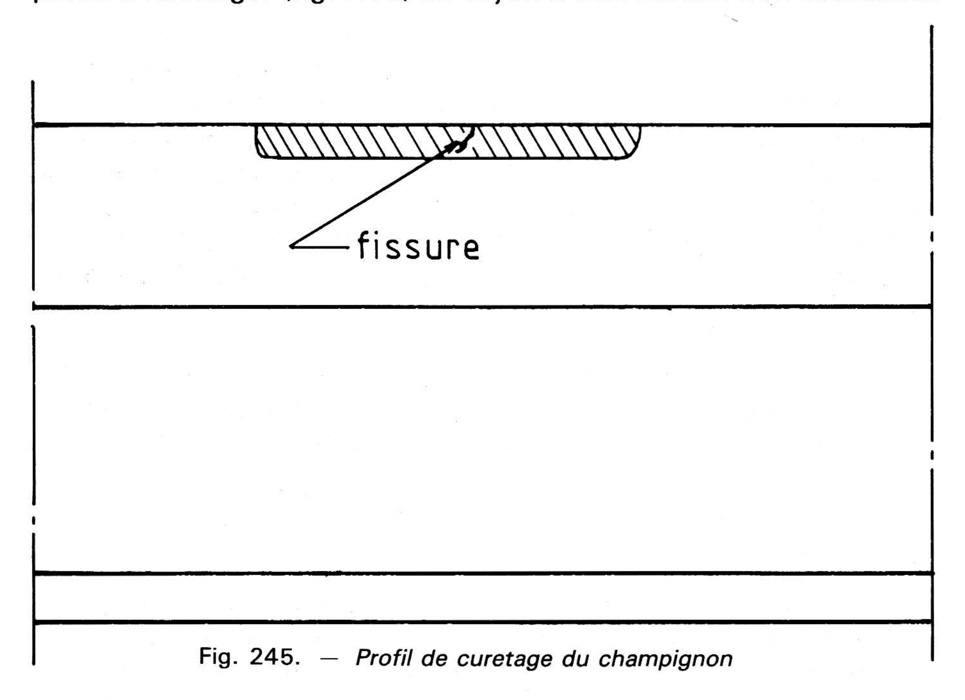


Fig. 245. — *Profil de curetage du champignon*

(1) On peut recharger des soudures creuses par un processus analogue.

d'avoir complètement éliminé la partie visible avariée, mais aussi d'avoir éliminé toute micro-fissure sous-jacente. Le curetage à la meule paraît préférable au curetage au chalumeau qui, bien que pouvant éviter le préchauffage, serait très délicat à exécuter. Il convient ensuite de procéder à un examen soigné après meulage : l'application d'un liquide ressuant tels que le rouge organol qui rend visible la présence de microfissures éventuelles. Si cet examen révèle une fissuration plus profonde que celle supputée à l'origine, il convient de procéder à l'élimination du coupon défectueux après éventuellement exécution d'un rechargement provisoire de façon à permettre le passage des circulations en attendant la réparation définitive.

L'opération nécessite après curetage un préchauffage à une température suffisante pour éviter tout choc thermique au moment du rechargement proprement dit : la température convenable reste comprise entre 350° et 400° contrôlée à l'aide de crayons thermochromes. Une température trop élevée risquerait d'entraîner des avaries de traverses et dispositifs d'attaches. On effectue le préchauffage en général au moyen de gaz propane, l'opération durant de 5 à 15 minutes. Les électrodes utilisées, à enrobage basique, en principe de 4 mm de diamètre, doivent faire l'objet d'essais préalables en laboratoire, afin de contrôler leur compatibilité avec le métal de base. Leur dureté Brinell est de 200 à 250 pour les rails et 270 à 310 pour les pointes de cœur en rails assemblés. Elles doivent être étuvées et soigneusement conservées à l'abri de l'humidité pour éviter que l'hydrogène provenant de la dissociation de l'eau à la température de l'arc électrique ne vienne former des flocons dans les cordons de soudure, après solidification, d'où résulteraient rapidement des fissures de fatigue.

Le rechargement doit ensuite être mené de façon à éliminer complètement tous les débuts et fins d'électrodes qui créent des cratères amorces de fissures à l'intérieur des cordons de soudure. Pour cela, la longueur de rechargement est limitée à celle des électrodes (en principe 350 mm) moins quelques centimètres et les cordons sont disposés longitudinalement.

— Pour les rechargements d'abouts, les cordons sont amorcés à l'extrémité du rail ; ceux qui sont déposés en première couche sont arrêtés en surépaisseur sur la table de roulement, le dernier revenant transversalement sur les cratères terminaux des cordons précédents qui sont ainsi refondus (fig. 246). Tous les cratères sont éliminés par meulage à la fin de l'opération.

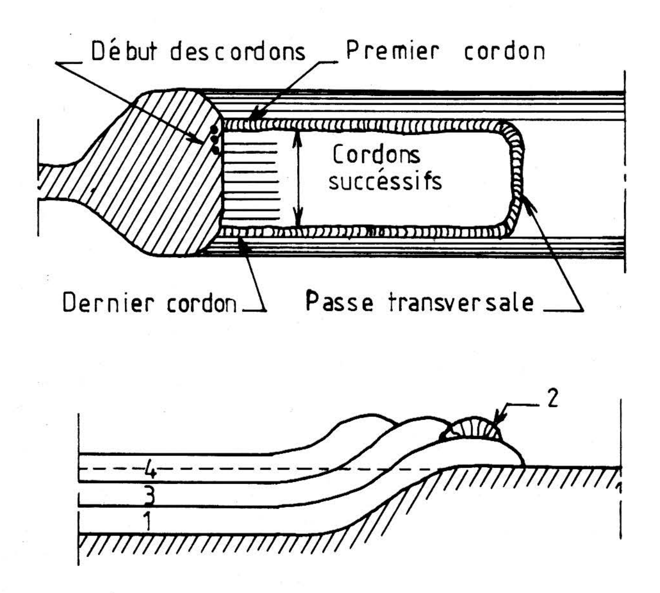


Fig. 246. — *Passes de rechargement d'about de rail*

— Pour les rechargements en pleine barre (fig. 247) les cordons de la première couche sont amorcés et terminés en surépaisseur sur la table de roulement pour être également éliminés par meulage de dégrossissage suivi d'un meulage de finition dès que le métal est revenu à température ambiante. Après passage d'un certain tonnage de circulation, un contrôle ultra-sonore peut permettre de s'assurer qu'aucune amorce de fissure soit d'origine, soit due au rechargement ne subsiste.

— Enfin, le rechargement d'empreintes de patinage ou de soudures creuses en LRS nécessite la prise de quelques précautions pour tenir compte des contraintes de compression dues aux élévations de température dans le rail et qui, comme nous l'avons vu, peuvent nuire à la stabilité transversale des barres : il convient à cet effet de limiter la température de préchauffage en vue de ne pas dépasser 350° et, dans le cas où la température du rail atteint ou dépasse une quarantaine de degrés de limiter le nombre de rechargements, quitte à opérer en plusieurs passes ou même à interdire ce genre de travail. Même pour des températures faibles, il est souhaitable de ne pas exécuter plus de trois opérations par file de rail sur une zone d'une cinquantaine de mètres de longueur : il revient à chaque réseau de préciser ses propres normes en fonction de ses conditions particulières.

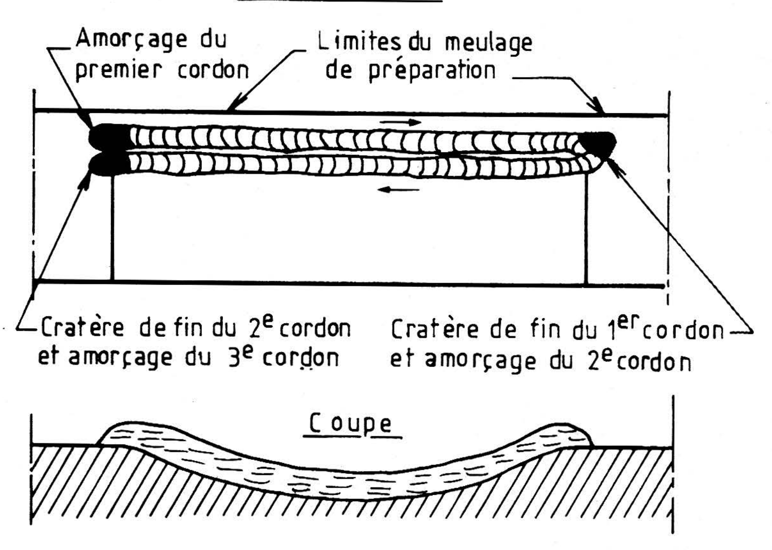


Fig. 247. — *Passes de rechargement de pleine barre*

3.5.3. Le rechargement des cœurs en acier Hadfield pose un problème particulier du fait de la structure austénitique de cette nuance d'acier qui est hors d'équilibre à température ambiante ; tout apport de chaleur tend à la détruire par précipitation des carbures qui s'accompagne de variations de volume, donc de contraintes résiduelles susceptibles d'entraîner des fissures. Il est donc indispensable de réduire au strict minimum l'apport local de calories. La méthode consiste, après meulage d'élimination des zones écrouies, à déposer des cordons étroits et courts. La juxtaposition immédiate de ces cordons est prohibée, leurs dépôts se faisant en alternance. On contrôle périodiquement avec des crayons thermochromes que la température ne dépasse pas 200°. Le préchauffage est évidemment rigoureusement interdit, et il est possible en atelier d'obtenir un refroidissement énergique et permanent par dépôt de neige carbonique autour du cordon.

3.5.4. Les multiples précautions que nous venons d'énumérer et qui sont à prendre à l'occasion de tout rechargement de rail ou de cœur au manganèse, imposent, c'est bien évident, une formation très poussée des soudeurs et un contrôle quasi continu de la qualité d'exécution de leur travail. Outre les précautions énumérées à respecter rigou-

reusement, le soudeur doit assurer en permanence une constance de longueur d'arc excluant tout cratère d'extinction, ce qui réclame une excellente habileté manuelle. Chaque soudeur qui reçoit une formation spéciale en école, doit apposer sa marque sur toute soudure exécutée par ses soins. Il est convoqué à des cours de perfectionnement périodiques, également destinés à contrôler son aptitude.

3.5.5. L'énergie nécessaire à la fusion du métal d'apport est fournie par des groupes électrogènes déplacés le long des voies en fonction des besoins. On peut en distinguer trois types principaux :

— Les groupes "lourds" (P $\geqslant$ 500 kg), en général autotractés (fig. 248) délivrant un courant de soudage de 70 à 280 ampères sous 23/31 volts et simultanément un courant auxiliaire de 3 à 4 Kva sous 220 volts. Ils peuvent posséder une double caractéristique, plongeante pour la fusion des électrodes, plate pour le soudage MIG. Insonorisés, ils sont généralement employés sur des chantiers importants.

— Les groupes "classiques" (P = 300 kg) (fig. 249) non autotractés délivrant un courant de soudage de 70 à 220 ampères sous 23/29 volts ou, hors soudage, un courant auxiliaire de 3 à 4 Kva sous 220 volts. Uniquement à caractéristique plongeante, ils sont insonorisés et sont employés sur les chantiers forains nécessitant de fréquents déplacements.

— Les groupes "légers" ou d'intervention (P # 150 kg((fig. 250) délivrant un courant de soudage de 70 à 180 ampères sous 23/27 volts ou, hors soudage, un courant auxiliaire de 3 Kva sous 220 volts. Non insonorisés, ils sont réservés aux chantiers ponctuels ou à ceux dont les caractéristiques locales (tunnels, viaducs, etc.) ne permettent pas l'emploi de groupes classiques.

Des automates de soudage (fig. 251) utilisant un fil fourré, déroulé à partir d'une bobine par des molettes de traction, peuvent également être utilisés pour la réparation des rails (défauts d'abouts ou en pleine barre). La qualité du dépôt dépendant de la constance des paramètres de soudage, la position du fil par rapport à la pièce à réparer est régulée soit à l'aide d'un gabarit reproduisant le profil du défaut, soit électroniquement par analyse permanente des paramètres de soudage (tension et intensité). Ce matériel dont le poids n'excède pas quelques dizaines de kilos apporte un gain de temps appréciable (10 à 20 minutes par opération au lieu de 60 à 90 minutes manuellement) et résoud en grande partie les problèmes délicats posés par la formation des soudeurs.

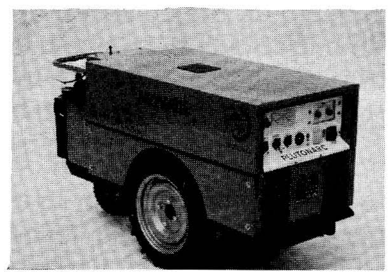


Fig. 248. — *Groupe lourd de rechargement*

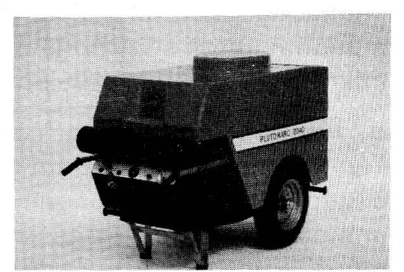


Fig. 249. — *Groupe moyen de rechargement*



Fig. 250. — *Groupe léger de rechargement*

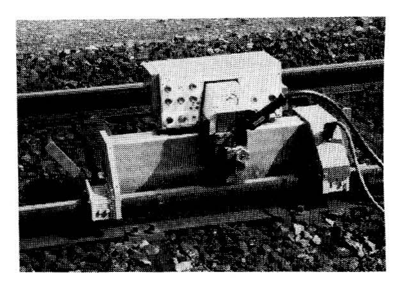


Fig. 251. — *Automate SAURON de rechargement*

Pour la réparation des cœurs en acier moulé au manganèse, le fil fourré peut être employé manuellement. Permettant de travailler sur une plus grande longueur, il réduit les risques d'échauffement du métal de base et améliore le rendement.

3.6. Dans le cadre de la maintenance curative, nous mentionnerons pour terminer la luttre contre le cheminement qui a perdu beaucoup d'intérêt depuis la généralisation des LRS.

3.6.1. Dans une voie éclissée, les rails cheminent longitudinalement dans le sens du mouvement des trains. Ce mouvement peut être contrarié par des causes locales dans les fortes pentes par exemple, le rail tendant à se déplacer vers le bas, quel que soit le sens de la circulation. Ce phénomène est la résultante de deux actions qui se superposent :

a. reptation du rail, due à la déformation par flexion au passage des trains, qui allonge les fibres du patin en contact avec les traverses ;

cet allongement ne pouvant se manifester par l'arrière où les déformations du rail sont bridées par le frottement dû à la présence des charges, tend à se développer vers l'avant des circulations.

b. libération partielle des contraintes dues à la dilatation contrariée : l'onde de soulèvement qui précède au moins le premier essieu d'un convoi autorise un allongement du rail qui libère de proche en proche une partie de la compression d'origine thermique ; la voie soulevée retombe un peu en avant de la position qu'elle occupait avant l'approche du train.

3.6.2. De nombreux dispositifs anticheminants ont été utilisés : éclisses munies d'ailes butées sur les têtes de tirefonds, dispositifs fixés au rail par des boulons et solidaires des selles ou s'appuyant par des ailes contre les têtes de tirefonds (fig. 252). Tous ces procédés présentaient l'inconvénient de fatiguer les tirefonds et nécessitaient un perçage spécial de l'âme du rail.

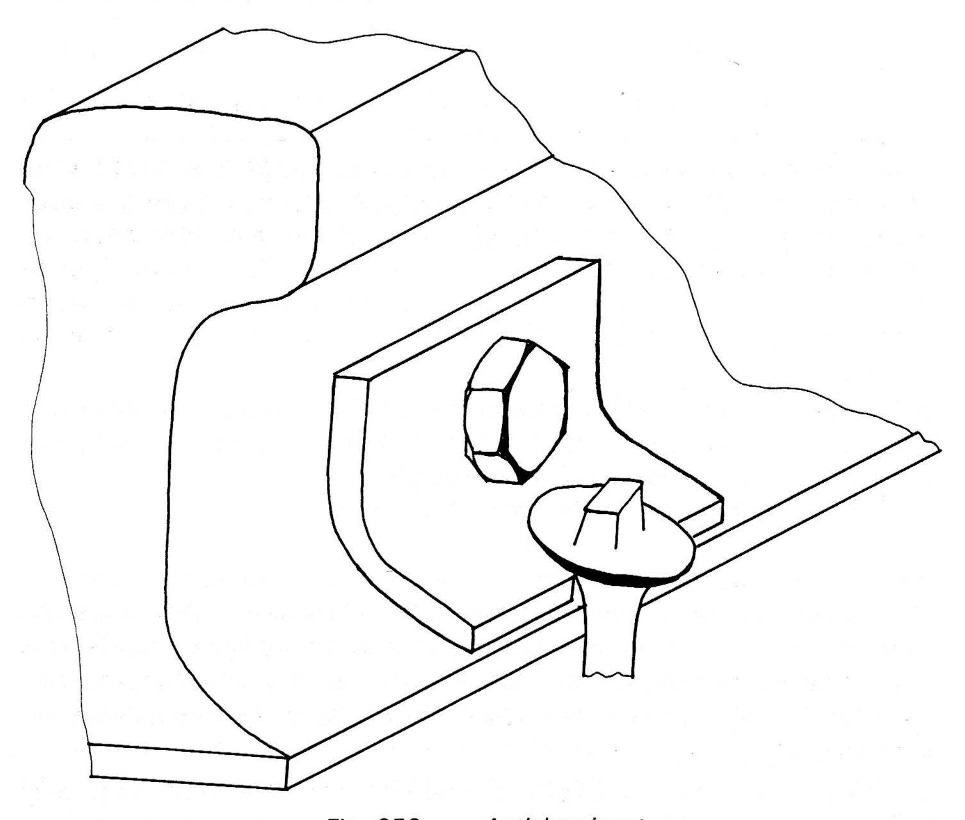


Fig. 252. — *Anticheminant*

3.6.3. On utilise maintenant des dispositifs en acier à ressort se coinçant sur le patin et reportant l'effort directement sur la traverse. Les derniers dispositifs à ressort utilisés par la SNCF (fig. 253) donnent entière satisfaction de ce point de vue.

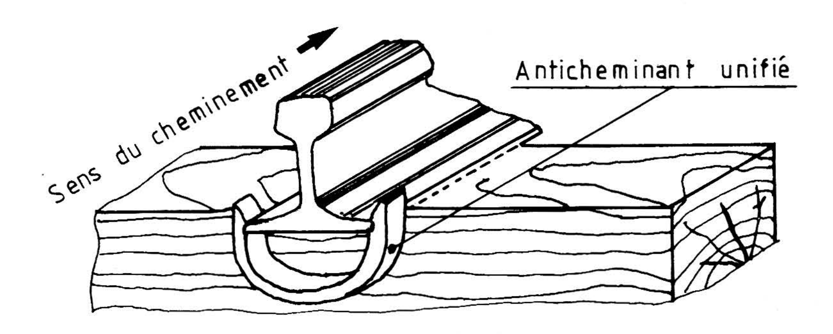


Fig. 253. — *Anticheminant SNCF*

3.6.4. Le problème est finalement résolu plus élégamment par les attaches élastiques qui, en dehors de leurs autres avantages, opposent une grande résistance au déplacement longitudinal du rail. Elles assurent, en effet, un serrage constant du rail sur la traverse quelle que soit la position de la roue et substituent au simple contact fer sur bois (pose directe) ou fer sur fer (pose sur selle) à coefficient de frottement peu fiable le double contact fer sur caoutchouc et caoutchouc sur bois ou fer, à coefficient de frottement élevé et beaucoup plus constant.

4. Coût de la maintenance du rail

4.1. De par l'importance des tonnages utilisés par un réseau, le rail représente globalement un investissement onéreux qu'il convient donc de ménager au maximum : c'est le but de la maintenance. Mais l'extrême diversité des facteurs en jeu ne permet pas de définir de règles économiques précises. Le bon sens et le calcul permettent cependant d'approcher l'optimum et nous nous livrerons à quelques réflexions à ce sujet.

4.2. Le coût kilométrique 1985 d'un renouvellement de rails est de l'ordre de 800 000 FF dont 50 % de fourniture de rails (soit 400 000 FF valeur à neuf). Supposons une ligne chargée de 120 000 t/jour soit environ 40 MT par an. Il est souhaitable de remplacer les rails au bout de 12 ans, après passage de 500 MT, pour permettre, après reprofilage en usine dans les conditions fixées au chapitre suivant, une deuxième utilisation sur une voie moins importante. Un amortissement sur douze ans correspond à un total de 85 000 à 120 000 FF/an suivant un taux d'intérêt variant de 6 à 12 %.

Les frais de maintenance varient progressivement de la première à la douzième année de 2 000 FF (coût des auscultations, tournées, etc.) à 25 000 F (compte tenu du coût croissant des réparations et remplacements de rails d'après la loi de Weibull). Ceci confirme, comme le constate la plupart des réseaux :

- que le coût annuel de la maintenance est inférieur à 5 % de la valeur à neuf
- que la qualité des rails d'origine est économiquement primordiale, car elle est le facteur de base à l'origine d'une grande partie des défauts.

Enfin le coût des réparations (rechargement, soudure aluminothermique) étant bien inférieur à celui des remplacements de rails, il convient d'en étendre le champ au maximum, à la fois directement et par le biais du développement des méthodes de contrôle non destructif.

Par exemple, un rechargement de rails coûte vingt fois moins cher qu'un remplacement de barre élémentaire en LRS, d'où l'intérêt d'une utilisation quasi systématique de cette méthode, chaque fois qu'elle est techniquement possible. Si en 1983, la SNCF a dû procéder à l'élimination de près de 16 000 défauts par remplacement de rails ou mise en voie de coupons, elle a fait procéder à la réparation par rechargement de 50 000 défauts superficiels et de près de 40 000 abouts de rails.

Le choix de la date optimale de renouvellement des rails est un problème très complexe qui fait intervenir un grand nombre de données : coût croissant des réparations et avaries avec l'âge lié à la densité du trafic, coût des interruptions de trafic dues aux avaries, possibilité de reprofilage des rails déposés, possibilité de réemploi, nature et importance du réseau. C'est donc un problème à résoudre par cas d'espèce, par un calcul de rentabilité prenant en compte les variables susmentionnées.

4.3. Sur la SNCF, la répartition des coûts des divers remplacements et réparations d'avaries et ruptures était approximativement la suivante en 1983 :

— défauts d'origine fabrication (dont 3/4 de 211/212)	23 %
— empreintes de patinage	31,5 %
— fissurations d'abouts	6,3 %
— usure et shelling	15 %
— soudures	7,8 %
— autres	16,4 %
	100 %

Le seul intérêt de ce tableau est de mettre en évidence l'importance du coût de maintenance de certaines avaries, les taches ovales, les empreintes de patinage et l'usure latérale. Aux États-Unis, les remplacements de rails ont coûté en 1983 640 millions de $, soit 3 à 4 % du capital rails investi dans les voies.

4.4. Cependant, lorsque le pourcentage croissant des défauts liés à la loi de Weibull atteint une valeur telle qu'elle entraîne des dépenses hors de proportion avec le but à atteindre (ces dépenses sont particulièrement liées à la densité du trafic), il faut envisager le renouvellement soit des rails seuls, soit de l'ensemble de la superstructure. Sur des lignes à fort trafic (par exemple 100 000/jour, soit 36,5 MT/an) la durée de vie des traverses en béton (50 ans) leur permet de supporter 2 vies de rails et d'attaches (2 × 25 ans, soit environ 2 × 900 MT du trafic) ; c'est évidemment une solution idéale. Le coût de remplacement d'un coupon de 6 m, sur une file, en LRS est de l'ordre de 1 à 2 % du coût du renouvellement complet de rails, qui n'est donc pas plus onéreux que la substitution de 75 coupons de 6 m, soit 450 m de rails ou 225 m de voie, en omettant d'ailleurs toutes les autres économies résultant du renouvellement. De tels calculs doivent être effectués par cas d'espèce par tous les réseaux en vue de prise de décision de caractère économique.

L'ensemble de ces mesures jointes à une réutilisation systématique des rails permet de réduire au maximum la consommation globale de rails d'un réseau ; pour les grands réseaux classiques européens, cette consommation peut varier de 1,5 à 3 T par kilomètre et par an correspondant à des durées de vie d'un rail de 30 à 60 ans. Un réseau

minéralier à forte charge par essieu et gros trafic peut par contre atteindre des chiffres sensiblement plus élevés. Enfin, les décisions à prendre sont d'autant plus aisées à appliquer qu'une analyse d'ensemble des problèmes de superstructures a été faite en temps utile : par exemple, la substitution d'un nouveau profil de rail sur des traverses préexistantes n'est possible ou tout au moins facile qu'à largeur de patin égale.

On peut en conclure qu'une maintenance menée de façon ordonnée et planifiée est une source importante d'économies. Nous en avons déjà vu un exemple fort important et qu'il est opportun de rappeler dans le chapitre consacré à la maintenance, à l'occasion de l'étude des problèmes posés par l'apparition et le développement de l'usure ondulatoire et des moyens de lutte contre cette dernière, dont l'application se révèle particulièrement rentable.

RÉSUMÉ DU CHAPITRE 10

La maintenance des installations est un des éléments fondamentaux de la sécurité et du coût. On distingue la maintenance préventive qui a pour but de conserver les installations dans un état aussi proche que possible de l'état neuf et la maintenance corrective qui permet de pallier les conséquences de tout incident ou avarie survenus en cours d'exploitation. Une bonne maintenance préventive permet précisément d'éviter au maximum les incidents de toutes sortes. Elle est essentiellement basée sur des interventions cycliques ou tout au moins sur des contrôles cycliques qui permettent de définir économiquement les programmes d'intervention. La maintenance préventive du rail commence dès sa fabrication et sa pose. Elle est ensuite basée sur des tournées de contrôle, soit visuelles avec par exemple démontage des joints, soit par le moyen des véhicules d'auscultation. Ces tournées sont complétées si nécessaires par des mesures d'usure, au moins en des points particuliers.

La maintenance curative du rail consiste essentiellement en la réparation des défauts détectés ou le remplacement des rails rompus inopinément. Le classement des défauts et les mesures de sécurité à prendre dès leur découverte sont de la responsabilité de chaque réseau concerné : on peut remplacer un rail ou un coupon, assurer une consolidation provisoire ou procéder à une réparation définitive.

Ce dernier cas fait l'objet d'une application systématique pour la réparation des empreintes de patinage ou de billage. On utilise à cet effet le rechargement par soudure à l'arc électrique moyennant un grand

luxe de précautions ayant pour but d'éviter de créer des chocs thermiques et d'enfermer dans le champignon du rail des amorces de fissures qui dégénèrent alors rapidement en ruptures. Pour réaliser ces rechargements, on utilise divers types de groupes de soudure, automoteurs ou non qui peuvent se déplacer le long de la voie. La formation des soudeurs est délicate et l'on peut utiliser dans certaines circonstances des automates de soudage. Enfin la réparation par soudure des cœurs en acier Hadfield nécessite des précautions particulières.

Les calculs économiques montrent sans équivoque l'intérêt financier des rechargements mais aussi d'une bonne maintenance préventive. Il ne faut pas oublier que la consommation annuelle moyenne de rails des grands réseaux européens varie de 1,5 à 3 tonnes par kilomètre.

11 USINES DE RECONDITIONNEMENT ET SOUDAGE DES RAILS

1. Évolution des rails en voie

1.1. Dans les précédents chapitres, nous avons vu comment pouvaient naître et évoluer les défauts des rails, les procédés de maintenance adoptés pour en limiter les effets néfastes et par ailleurs le choix des nuances et des profils ainsi que les procédés de pose permettant d'adapter en permanence la superstructure de la voie ferrée au trafic qu'elle est appelée à supporter.

Avec le temps et le développement du trafic, le vieillissement des divers éléments constitutifs devient peu à peu irréversible et il convient d'en remplacer tout ou partie ; on est alors amené à procéder à un renouvellement total ou partiel : le renouvellement complet concerne la totalité des éléments rails, traverses et ballast, les renouvellements partiels intéressant soit les rails, soit le ballast, soit les traverses avec renforcement éventuel du plancher. Un renouvellement n'est pas toujours justifiable par un calcul de rentabilité sauf pour des lignes à très fort trafic ; il résulte en général du mauvais état du plancher en bois, d'une trop forte pollution ou d'une insuffisance d'épaisseur du ballast, d'une inadaptation de la superstructure à l'évolution du trafic ou enfin d'une augmentation trop rapide des avaries de rails ou de soudures.

Mais les rails déposés conservent une importante valeur marchande et la plus grande part est récupérable après traitement en atelier en vue d'éliminer les portions mauvaises, de rétablir un profil convenable de la table de roulement et de souder les éléments sains en longueurs standards ou en L.R.S. Un rail déposé d'une ligne de l'un des trois premiers groupes UIC et ayant supporté quelques centaines de millions de tonnes de trafic peut assurer une seconde vie sur une ligne des groupes suivants ou être utilisé pour des remplacements en recherche de rails trop usés ou prématurément avariés.

1.2. Jusque vers 1960, les seuls traitements auxquels les rails pouvaient être soumis dans les ateliers ont consisté en un ébavurage, à l'aide d'outillages apparentés à ceux qui étaient utilisés en voie. C'est à cette époque que sont apparues les premières machines modernes, et en particulier, sur la SNCF, l'atelier-magasin de Saint-Dizier fut équipé pour ce genre de traitement.

1.3. Sous l'action des charges de trafic, les rails sont affectés d'usure et de déformations de caractéristiques variées :

- l'usure ondulatoire courte ou longue, que l'on peut économiquement éliminer en voie par meulage, comme nous l'avons vu au chapitre IX
- les déformations d'origine (dressage en usine) ou survenues à la pose (rails faussés). Ces défauts, souvent difficiles à constater de visu, échappent à tout processus de maintenance en voie
- les déformations permanentes du profil en long résultant d'une insuffisance de la maintenance géométrique de la voie
- l'usure verticale ou latérale

La précision du rétablissement de la géométrie du rail dans ses deux plans principaux est de l'ordre du centième de millimètre ; seul le meulage en voie permet de la rétablir, dans le cas de l'usure ondulatoire dont la longueur d'onde est compatible avec le type de traitement. Par contre, la précision du nivellement et du dressage du rail dans son ensemble ne dépassent pas le millimètre et l'on conçoit que l'on n'ait pas encore réussi à rétablir en voie par rabotage un profil géométrique correct ; seule, la machine-outil en usine permet d'obtenir

la précision requise, ce fait justifiant à lui tout seul l'intérêt d'installation d'usines de traitement de régénération du rail.

1.4. Par ailleurs, nous avons vu que l'on utilise systématiquement la pose en LRS, les barres élémentaires étant assemblées en usine par soudure électrique. Ce qui est vrai pour les rails neufs l'est aussi pour les rails régénérés, de sorte que l'on conçoit que ces deux types de rails puissent utiliser des installations communes de stockage, soudage, manutention et chargement, les rails de réemploi subissant par ailleurs un traitement spécifique. Ceci explique que les ateliers de traitement soient souvent banalisés en étant capables d'absorber aussi bien des rails usés que des rails neufs et en produisant des longueurs quelconques, soudées ou non, depuis le coupon de 4 ou 6 m jusqu'aux barres élémentaires de LRS. Les rails neufs sont livrés en longueurs de 18, 25 ou même 36 m, les parties récupérables des rails usés étant soudées entre elles pour fabriquer les longueurs utiles à la demande.

1.5. La société MATIX Industries, spécialisée dans l'étude et la réalisation de telles usines a adopté des conceptions modulaires permettant de répondre aux besoins spécifiques de chaque réseau et donnant la possibilité de compléter sans fausse manœuvre une installation, dans la mesure où la conception d'origine prévoyait la possibilité d'une telle extension. Nous décrirons donc une installation type capable de résoudre la totalité des problèmes posés.

2. Conception générale d'une usine de reprofilage et soudage

2.1. Une installation complète se présente de la façon suivante :

- une aire de déchargement et stockage des rails neufs
- une aire de déchargement et stockage des rails usés
- une installation de sondage ultrasonore, redressage et recoupe des rails usés, ainsi que l'évacuation des chutes
- une installation de reprofilage des rails usés

— une installation de soudage et finition
— une installation de mise à longueur de rails courts de réemploi
— une aire de stockage des rails usinés
— une installation de chargement sur wagon des rails courts et sur trains des rails longs.

Ces installations sont groupées suivant un plan type (fig. 254) qui permet d'utiliser la soudeuse indifféremment pour des rails neufs ou pour des rails usés. On obtient ainsi une très grande souplesse d'utilisation dans le cadre du programme de soudage, fonction des besoins exprimés à l'avance par les utilisateurs.

2.2. Nous passerons en revue les différents postes d'une installation complète :

2.2.1. Les aires de stockage de rails neufs ou usés sont desservies à l'aide de portiques qui permettent de décharger les wagons situés sur une voie parallèle. Des pinces de préhension automatique (fig. 255) évitent toute intervention humaine et par conséquent tout risque d'accident. On peut également utiliser des plateaux magnétiques.

2.2.2. La préparation des rails usés nécessite toute une série d'opérations. La table de roulement du rail est tout d'abord nettoyée à l'aide d'une brosse rotative, afin d'assurer un bon contact aux palpeurs ultrasonores qui permettent, avec une vitesse de défilement de 1 m/sec, de détecter les défauts internes pouvant dégénérer en rupture. Le rail est ensuite redressé à l'aide de presses hydrauliques verticale et horizontale ou d'une presse combinée dont la puissance est de 100 à 200 tonnes.

Toutes les parties mauvaises (abouts usés, trous d'éclisses, fissures détectées aux US) sont alors éliminées par sciage. D'une façon générale, à partir de rails de 18 m, on s'efforce de récupérer le maximum de coupons de rails d'une longueur de l'ordre de 17 m.

2.2.3. Le rail usé qui peut présenter de l'usure latérale et des bavures du champignon, des défauts superficiels et de l'usure ondulatoire,

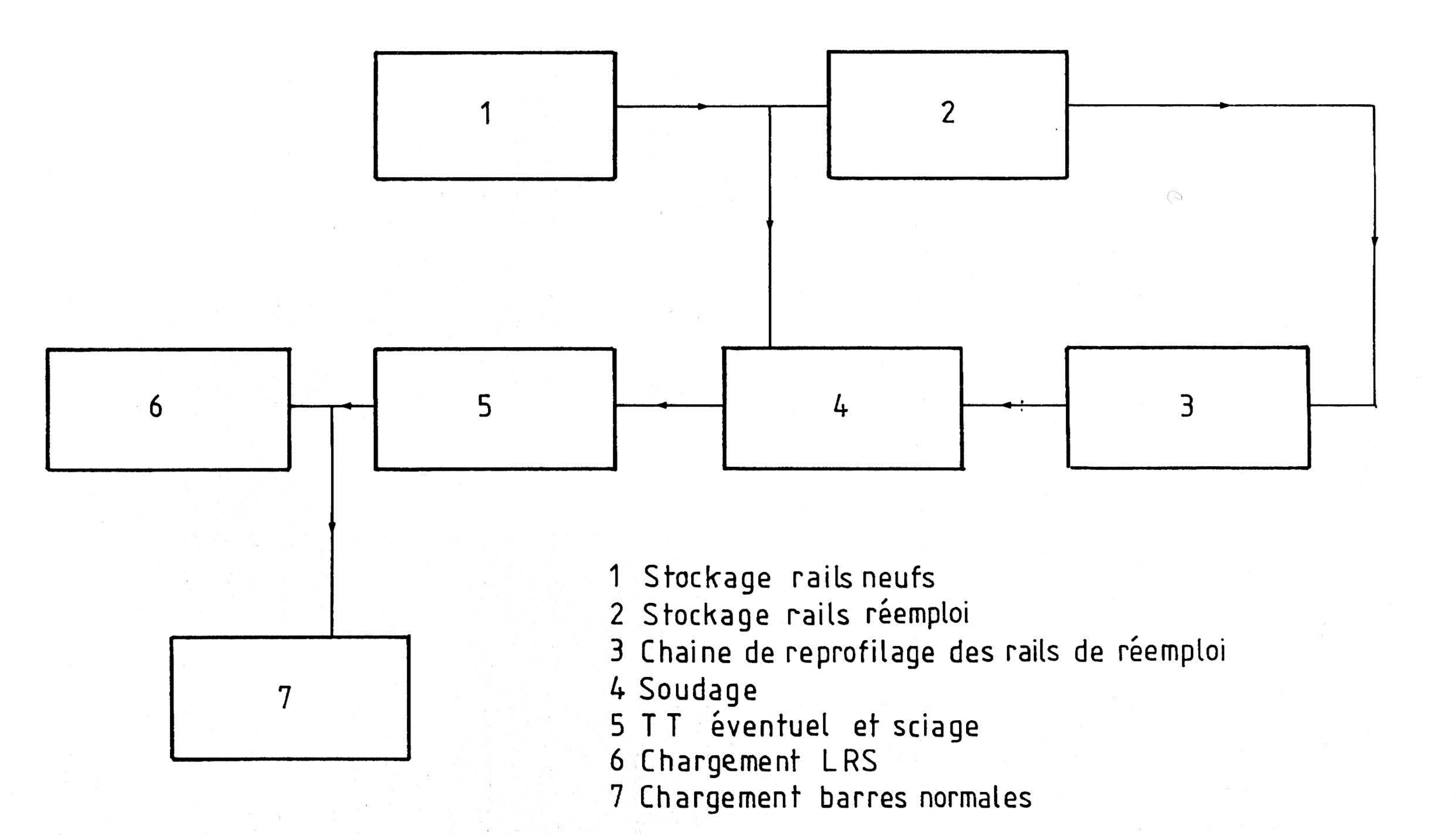


Fig. 254. — *Plan-type d'usine*

est régénéré suivant un profil normal, avec perte de métal de l'ordre d'un kg/mètre, ce qui ne pose aucun problème de réemploi. Seules sont traitées la surface de roulement et la file directrice. Deux techniques sont possibles :

- Le reprofilage à l'aide d'une raboteuse MMR-LINE (fig. 256) de 30 m de course sur laquelle les rails sont bloqués à l'aide de vérins hydrauliques latéraux ; cette machine permet de traiter deux rails à la fois à l'aide d'outils de coupe adaptés au profil désiré en enlevant jusqu'à 1 mm de métal par passe. Le rendement est de l'ordre de 250 m/h par passe. On peut également procéder par fraisage, ce procédé étant cependant plus délicat et plus onéreux sans offrir d'avantages particuliers.
- Le reprofilage à l'aide d'une machine type MRR-SNCF (fig. 257) dans laquelle c'est le rail qui avance et non plus l'outil qui se déplace et dont le rendement instantané est de l'ordre de 240 m/h. Le rail est entraîné par des galets, le nombre de têtes variant de une à cinq, suivant la cadence désirée et le profil d'usure moyen du champignon. Cette machine est moins onéreuse que la raboteuse, mais au prix d'une précision un peu moindre.

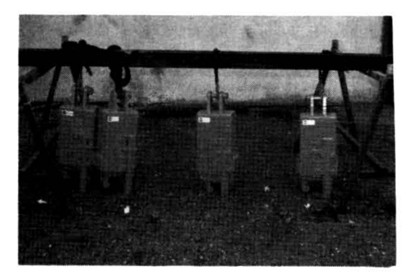


Fig. 255. — *Pince de préhension automatique*

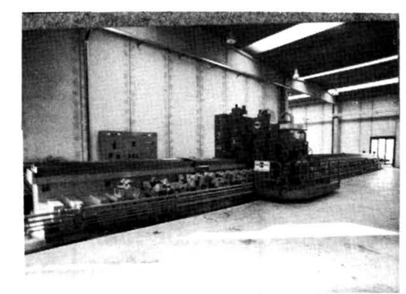


Fig. 256. — *Raboteuse à rails LINE*

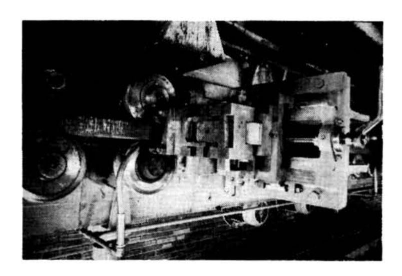


Fig. 257. — *Reprofileuse SNCF*

Dans les deux cas, la hauteur résiduelle de rail après rabotage est mesurée et marquée automatiquement aux extrémités.

Les rails reprofilés sont classés en fonction du profil, de l'usure et de la file de roulement.

2.2.4. Le soudage, que nous avons traité au chapitre 6 consacré à la pose de voie, est suivi d'un meulage et d'un dressage de précision. Après soudage, on obtient soit des LRS, soit des rails élémentaires qui sont coupés à la longueur désirée en perçant éventuellement des trous d'éclissage aux abouts.

L'installation peut être complétée par un dispositif de traitement thermique par induction des abouts des rails courts qu'elle produit. Il est enfin possible en bout de chaîne de contrôler la rectitude des rails longitudinalement et transversalement.

2.2.5. Les diverses manutentions de rails sur les lignes de soudage et de reconditionnement peuvent être commandées individuellement par chaque poste de travail, ou être entièrement automatisées par l'intermédiaire d'un automate programmable, ce qui rend plus rationnel et plus économique le déroulement du travail. Dans ce cas, les seules commandes individuelles concernent la mise en place des rails sur les chaînes à l'aide de portiques, directement ou par l'intermédiaire d'une ligne de rouleaux, le chargement sur trains des LRS à l'aide de translateurs latéraux et l'évacuation des rails et coupons à la sortie des tables de stockage.

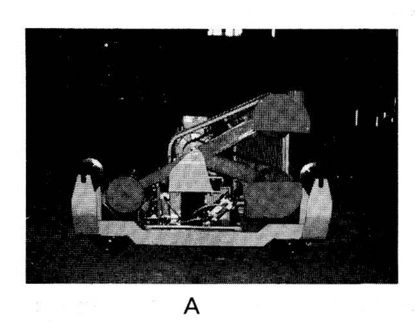
L'avancement des rails se fait à l'aide de rouleaux libres, ou entraîneurs (vitesse de l'ordre de 1 m/s), celui des LRS par de puissants rouleaux presseurs. Les évacuations latérales s'opèrent par des tables de transfert à commande automatique. C'est au total la cadence de la soudeuse qui commande l'avancement global de la chaîne de soudage.

Enfin, l'ensemble de la chaîne est équipé de dispositifs automatiques d'aspiration des poussières et d'évacuation des copeaux.

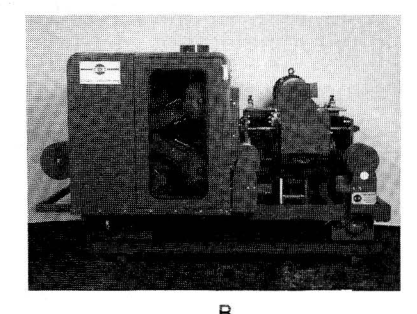
3. Les machines utilisées

Nous allons maintenant procéder à un examen plus détaillé des diverses machines composantes de la chaîne en rappelant leur désignation dans la classification MATIX, les outillages proposés par cette société pouvant être considérés comme à l'avant-garde de la technique.

3.1. Brosseuses (fig. 258)



A



B

Fig. 258 A/B. — *Brosseuses*

Ces machines sont destinées à éliminer, par abrasion, la couche d'oxyde ou les impuretés qui recouvrent la table de roulement, la partie inférieure du patin et chaque extrémité du rail, afin de permettre un bon contact, soit des palpeurs ultrasonores soit des électrodes des soudeuses avec le rail, soit enfin d'obtenir des surfaces en contact propres au moment des accostages de la soudeuse par étincelage. Les brosseuses peuvent fonctionner de façon entièrement automatique (MBR 6) par reconnaissance de la présence des rails ou de façon semi-automatisée (MBS 12 et MBS 14). Chaque brosseuse comprend :

— 1 chariot-support reposant sur 4 roues qui assurent le déplacement de l'ensemble parallèlement au rail par l'intermédiaire d'un vérin pneumatique
— des rouleaux d'appui et de centrage dont le rôle est de guider les rails pendant les opérations de brossage

- des bras porte-brosses avec moteurs électriques oscillant autour d'un axe commun. L'ouverture et la fermeture des brosses sont obtenues à l'aide de vérins pneumatiques
- un dispositif de détection de présence du rail en cas de fonctionnement automatique.

Par mesure de sécurité, l'application des brosses sur le rail ne peut être obtenue que pendant la période de déplacement de la brosseuse pour éviter tout risque de brossage intense localisé. Les brosses tournent à 3 000 tours par minute et suivant le type, la puissance varie de 5 à 25 kW.

3.2. Poste de contrôle par ultrasons (fig. 259)

Ce poste (MPU 3) permet la détection, de manière entièrement automatique, des fissures transversales du champignon des rails et des fissures horizontales sur toute la hauteur du rail. Les trous d'éclissage, systématiquement éliminés, ne nécessitent aucun contrôle.

Chaque fois qu'un défaut est détecté, une alarme sonore avertit l'opérateur qui peut arrêter le défilement du rail en vue d'une inspection détaillée et du marquage à la peinture de la zone défectueuse.

L'ensemble électronique analogue à celui des voitures de contrôle comprend :

- une alimentation
- un module de visualisation des défauts
- un module groupant les fonctions de balayage, de commutation d'affichage et synchronisation
- des émetteurs-récepteurs (0° et 2 × 70°)
- un sélecteur double.

Le rail à contrôler est guidé à travers un châssis qui comporte deux cellules de détection de présence du rail et un système automatique de mise en place de la tête de sondage.

L'ensemble est commandé par un dispositif alimenté en air comprimé. De plus, des circuits d'eau adéquats permettent d'assurer le contact acoustique nécessaire entre les traducteurs et le rail.

Les seuils minimals de détection de défauts correspondent à un trou

de 3 mm de diamètre, percé transversalement et horizontalement dans la tête du rail (défauts transversaux) et à un trait de scie de 4 × 4 mm (défauts horizontaux).

L'équipement permet de contrôler tous les types de rails dont le poids par mètre est compris entre 40 et 78 kg.

3.3. Presse hydraulique de redressage de rails

On utilise deux types de presses.

3.3.1. Machine fixe type "Col de cygne" MPE 150 spécialement réalisée pour le redressage des rails, en principe des rails à reprofiler (fig. 260).

Le retournement du rail pour dressage dans les deux plans vertical et horizontal est obtenu par des doigts placés en quinconce qui coulissent verticalement dans des lumières pratiquées dans la table. Des galets, commandés pneumatiquement, maintiennent le rail horizontalement pendant le travail de redressage. Le dressage en première phase des rails usés nécessite ce type de presse ; en effet, la concavité systématique vers le bas des rails déposés n'est visible, donc corrigible, que lorsque le rail repose sur le flanc.

La force est de 1 500 kN et la pression hydraulique de 212 bars.

Presse mobile

3.3.2. La presse quadrilatérale modèle SPM est essentiellement destinée au dressage des soudures.

Cette machine (fig. 261) permet le redressage de n'importe quel type de rail dans le plan vertical et dans le plan horizontal, sans qu'il soit nécessaire de procéder à des basculements. Elle sert essentiellement au dressage après soudage. L'ensemble de la machine est monté sur un châssis mobile motorisé permettant une mise en place précise.

La presse quadrilatérale mobile comprend :

- 1 châssis lourd
- les systèmes de dressage hydraulique verticaux (250 tonnes) et horizontaux (120 tonnes)
- la plateforme de déplacement avec son moteur hydraulique
- le groupe hydraulique avec réservoir d'huile (7,5 kW).

3.4. Reprofileuse

3.4.1. On peut envisager deux dispositifs, soit avec déplacement du rail, soit avec déplacement de l'outil. Le premier type a été mis au point en 1960 dans les ateliers de la SNCF (fig. 257). Les porte-outils fixes comportent un certain nombre d'outils de forme capables de redonner un profil normal au rail soit sur un seul côté du champignon, soit sur la totalité. L'épaisseur de métal enlevé varie de 0,8 à 2 mm. On peut utiliser de 1 à 5 têtes de rabotage. Les rails sont entraînés par un double jeu de galets, les uns moteurs, les autres fous prenant appui sur les portées d'éclissage. Avec une puissance totale de 75 kW, on peut envisager une vitesse de coupe de l'ordre de 4 mètres par minute avec une vitesse d'avance atteignant 240 m à l'heure pour cinq têtes de rabotage. Ce type de machine économique et assez rustique n'éprouve de difficultés qu'au passage des soudures.

3.4.2. La reprofileuse (MMR LINE) (fig. 262) est une machine puissante, spécialement conçue pour le reprofilage de rails de chemins de fer qui permet de reconstituer le profil d'origine de la table de roulement des rails, par rabotage, au moyen de couteaux de forme en acier rapide.

Il s'agit d'une machine à banc, formant table fixe, sur laquelle le rail à raboter est solidement bridé au moyen de vérins hydrauliques à direction horizontale et verticale (une cinquantaine de vérins horizontaux de 8 tonnes), les unités porte-outils étant fixées sur une traverse mobile lourde permettant le travail dans les deux sens de marche. La course, d'une vingtaine de mètre, permet de reprofiler les rails courants en une seule passe. On peut reprofiler deux rails à la fois.

L'entraînement se fait par moteur à courant continu à partir d'un

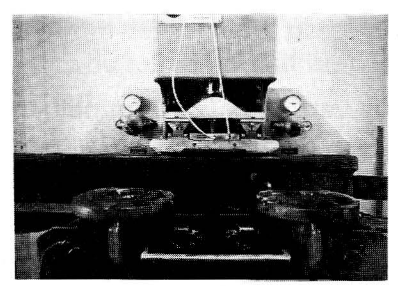


Fig. 259. — *Contrôle ultra-sonore à poste fixe*

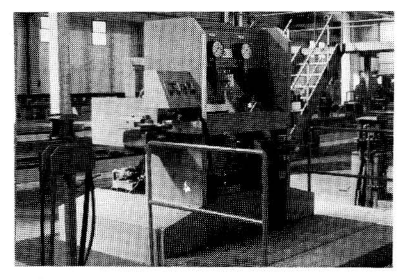


Fig. 260. — *Presse à col de cygne*

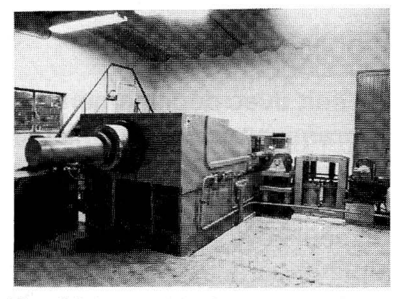


Fig. 261. — *Presse quadrilatérale*

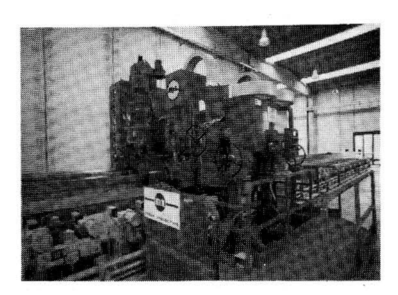


Fig. 262. — *Raboteuse LINE*

groupe Ward-Leonard de 50 kW. La vitesse de travail peut varier de 4 à 20 m/mn de façon continue.

En fait, on peut compter sur une production moyenne de 250 m à l'heure.

Cette machine est caractérisée à la fois par sa rapidité et une excellente qualité d'exécution.

On peut aussi utiliser des fraiseuses à longue course, mais la fraise paraît moins bien adaptée que l'outil de coupe au reprofilage des rails et le fraisage est sensiblement plus onéreux. La fraise de forme est un outil pastillé au carbure à axe vertical.

3.5. Scies

3.5.1. Une unité de reconditionnement de rails provenant de dépose comprend en général deux types d'installations de sciage, l'une sim-

plement destinée à éliminer les parties mauvaises (abouts usés, défauts visibles ou détectés aux ultrasons, usures localisées), l'autre à couper à longueur exacte les rails courts de longueurs standards ou les coupons, voire dans certains cas, les LRS.

3.5.2. Le premier type (fig. 263) relativement simple (FS 02) est constitué par une scie circulaire à plusieurs vitesse de coupe, quatre en général (vitesse périphérique de 7 à 20 mètres à la minute), liées à la dureté des rails intéressés. Les vitesses sont sélectionnées par une boîte à engrenage. Le rail à couper est serré par des mors et le chariot porte-scie, actionné par une commande hydraulique, est à avance réglable de 0 à 630 mm/min. La puissance de la scie est de l'ordre de 8 kW.

3.5.3. Le deuxième type (fig. 264) est un ensemble de sciage-perçage mobile (CBM 6) incorporé dans une installation de soudage électrique de rails reconditionnés et ayant pour but de recouper la longue barre soudée aux longueurs souhaitées (par exemple 18, 24 ou 36 m). Lorsque ces barres sont destinées à être éclissées en voie, on perce, simultanément au sciage, les trous d'éclisses au moyen des deux unités de perçage multi-broche situées de part et d'autre de la lame de scie.

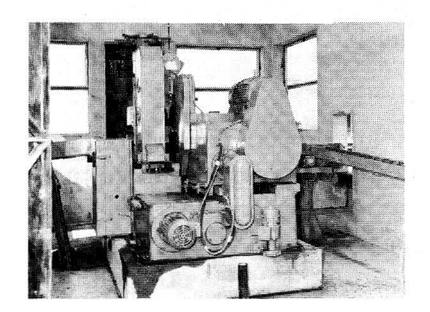


Fig. 263. — *Scie FS 02*

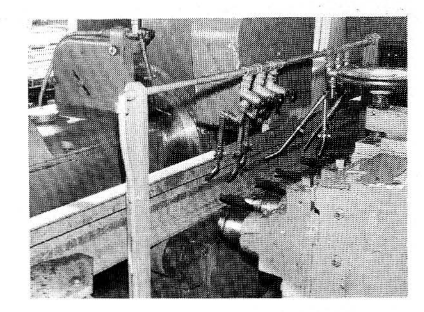


Fig. 264. — *Scie CBM 6*

L'ensemble est mobile pour permettre de mettre en place la lame de scie à une distance constante de l'extrémité aval de la longue barre et ceci quelle que soit la position de cette extrémité.

L'ensemble de sciage-perçage mobile est donc composé de :

- 1 unité de sciage équipée d'une scie circulaire à segments rapportés d'un diamètre de 610 mm, montée sur un chariot dont le mouvement d'avance est assuré par un vérin hydraulique indépendant permettant une gamme de vitesses d'avance continue comprise entre 0 et 610 mm par minute
- 2 unités de perçage multi-broches, chacune comprenant 3 broches déplaçables individuellement pour le réglage de l'entraxe et de la position des trous d'éclisses
- 1 ensemble de rouleaux porteurs de rails de part et d'autre de la machine et équipés d'un dispositif d'éclipsement par circuit hydraulique
- 1 centrale hydraulique assurant tous les déplacements réalisés hydrauliquement (avance de la scie, des blocs de perçage, rouleaux de support)
- 1 plateforme mobile motorisée pour le déplacement longitudinal de la scieuse-perceuse
- 1 système de mesurage de longueur de rails jusqu'à 35 m dont le but est d'obtenir une position de la lame de scie à distance constante de l'extrémité aval de la longue barre.

3.5.4. L'ensemble de mesurage (fig. 265) se déplace longitudinalement avec la plateforme. Il comprend essentiellement :

- 1 portique équipé de 2 cellules photo-électriques pour intercepter l'extrémité aval de la longue barre
- 1 rail étalon de longueur pouvant aller jusqu'à 36 m dont la table de roulement est équipée en totalité d'une règle graduée en mm. Ce rail étalon subissant les mêmes variations de longueur dues aux effets thermiques que la barre à recouper en éléments unitaires, la précision de coupe est assurée quelle que soit la température.

On peut également utiliser un système à butée dans lequel l'opérateur règle automatiquement la position du chariot porte-butée par rapport à la scie. Ce système est plus astreignant que la "butée immatérielle" constituée par les cellules photo-électriques. La précision sur la longueur est la même dans les deux systèmes : elle correspond largement aux exigences de la fiche 869 UIC, soit

$\pm$ 2 mm jusqu'à 18 m de longueur

± 3 mm de 18 à 24 m
± 4 mm de 24 à 35 m (± 6 mm pour 36 m en LRS)

Entraxe des trous de perçage ± 0,5 mm.

3.6. Mesureur d'usure de rails reprofilés

Cet appareil (MMU-4) donne avec une grande précision après reprofilage la diminution de hauteur d'un rail usé, la mesure étant faite par rapport à la hauteur théorique du même rail à l'état neuf.

Le mesureur d'usure (fig. 266) est donc implanté en aval de la reprofileuse de rails et composé principalement de :

— 1 portique de support et de guidage du dispositif de mesure
— 1 dispositif de support et de guidage du rail
— 1 palpeur indicatif
— 1 dispositif d'affichage digital de la valeur mesurée.

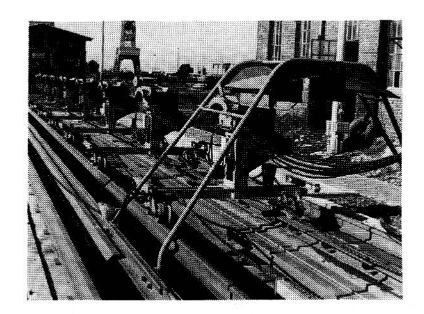


Fig. 265. — *Ensemble de mesurage*

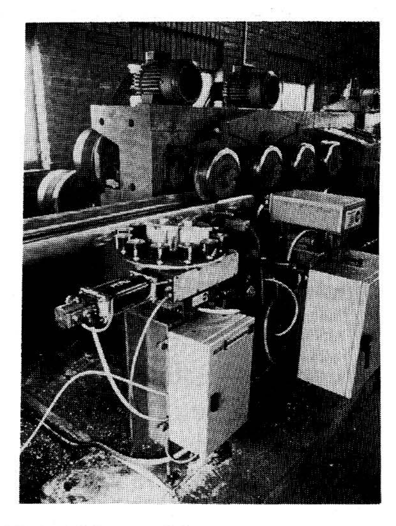


Fig. 266. — *Mesureur-marqueur d'usure*

Lorsqu'on change de profil de rail, il suffit de réajuster la position "0" de la descente du capteur au moyen d'un bouton moleté qui déplace un index en regard d'un vernier millimétrique sur lequel sont repérés les différents types de rails à mesurer.

Ce dispositif permet également par utilisation d'une roue codeuse dont la périphérie est connue avec précision de mesurer la longueur des rails avant soudure. Un micro-ordinateur pourrait ainsi permettre l'optimisation (réduction du nombre des soudures) de l'utilisation des coupons.

3.7. *Meuleuse automatique de finition des soudures*

Le meulage de finition a pour but de réaliser le parachèvement géométrique des soudures de rails avec une précision de l'ordre de 1/100 mm.

La meuleuse de finition se place donc en dernière position sur une chaîne de soudage et intervient sur des soudures ébavurées, froides, et ayant subi un redressage à la presse dans chacun des deux plans vertical et horizontal.

La meuleuse comprend un cadre de guidage appliqué par l'intermédiaire de palpeurs sur deux points du rail situés de part et d'autre de la soudure et servant de références.

Ce cadre peut être incliné transversalement de part et d'autre du rail jusqu'à la position verticale, tout en restant appliqué sur les palpeurs qui décrivent le profil du rail. Le cadre supporte une tête de meulage animée d'un mouvement longitudinal alternatif.

La combinaison des deux mouvements permet à la meule d'occuper toutes les positions correspondant à la lecture des palpeurs. La machine, automotrice, se déplace longitudinalement pour se présenter au droit de la soudure à meuler.

Le cadre de guidage supporte une tête de meulage constituée par une meule boisseau, son moteur d'entraînement et les moyens d'avance et de remontée. La tête de meulage est animée d'un mouvement de va-et-vient dans le cadre de guidage grâce à l'action de deux vérins placés de part et d'autre du plan de symétrie. L'amplitude du va-et-vient est réglable et correspond à la course de meulage.

La machine est entièrement carénée et comporte les dispositifs d'aspiration et de filtrage des poussières de meulage.

Une fois les réglages préliminaires effectués, le fonctionnement de la meuleuse peut être entièrement automatique ou manuel. Si l'on

souhaite avoir la possibilité de surfacer la partie inférieure du patin du rail pour faire disparaître le bourrelet de soudure qui subsiste après ébavurage, on utilise un type de meuleuse (MMA 13) tout à fait analogue (fig. 267), simplement complétée par une bande abrasive qui défile transversalement par rapport à la surface inférieure du patin du rail.

3.8. Mesureur-enregistreur de rectitude des soudures (fig. 268)

Cet appareil de haute précision (MRS 15) permet d'enregistrer, de manière entièrement automatique, les flèches résiduelles, tant dans le plan horizontal que vertical pouvant éventuellement subsister après soudage électrique de deux rails.

La mesure se fait sur la base de 1,50 m ou 1 m, soit 0,75 mm ou 0,50 mm de part et d'autre de la soudure.

Le principe consiste à comparer une génératrice du rail à contrôler avec une ligne droite matérialisée par une règle maintenue parallèlement à l'axe longitudinal du rail, à l'aide d'un palpeur. Afin de contrôler simultanément la table de roulement et les deux flancs du champignon des rails, on utilise trois ensembles règle/palpeur.

L'enregistreur analogique permet l'inscription de 3 paramètres, avec une amplification de 5 à 10 fois :

- variation de la table de roulement par rapport à la règle de référence
- variation du flanc droit et du flanc gauche du champignon du rail par rapport à la règle de référence.

3.9. Dispositif de trempe des abouts de rails

Une fois les rails reprofilés, soudés et recoupés à la longueur désirée, il est possible de durcir les abouts par phénomène de trempe : on utilise à cet effet un dispositif à induction (fig. 79). Des thyristors alimentés par une tension continue de l'ordre de 440 volts délivrent dans un onduleur la haute fréquence nécessaire (10 kHz) pour obtenir un chauffage rapide de l'about de rail. La puissance utile est de

l'ordre de 30 kW. La trempe s'opère à l'aide d'un jet d'eau pulvérisée sous pression d'au moins 2,5 bars/cm². L'inducteur permet ensuite, si jugé nécessaire, de procéder à un revenu de la soudure par un post-chauffage approprié.

4. Appareils de manutention

4.1. L'ensemble des opérations de manutention et transports de poste à poste est entièrement automatique et ne nécessite par conséquent la présence d'aucun personnel. Hormis les stockages amont et aval, c'est le soudage qui commande la cadence de fonctionnement de la totalité de la chaîne de traitement.

4.2. Pince automatique de préhension de rails (fig. 255)

Cette pince automatique (PMR 4) permet à l'opérateur de portiques de manutention de rails d'assurer sans aucune intervention d'une tierce personne la préhension et la dépose automatiques du rail à distance.

La pince, d'un poids d'environ 100 kg, fonctionne avec une gamme étendue de rails avec le cycle suivant :

— pose sur le rail et accrochage
— relevage avec rail accroché
— pose avec rail accroché et ouverture des doigts de préhension
— relevage à vide.

Cette pince convient à tous les types de portiques, sa fixation au crochet du système de levage du portique se faisant par simple accrochage.

4.3. Convoyeurs de rails

4.3.1. Les convoyeurs de rails (MCR 2) servent au déplacement automatique longitudinal de rails courts et longs dans les différentes configurations pouvant se présenter dans les installations de reconditionnement et de soudage de rails (fig. 269). Suivant le cas, les convoyeurs résultent de combinaison de matériel standard en fonction du genre et de la précision d'acheminement du rail que l'on veut obtenir.

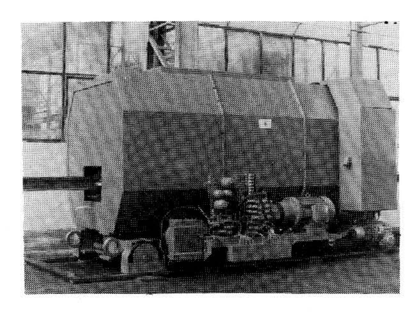


Fig. 267. — *Meuleuse MMA 12*

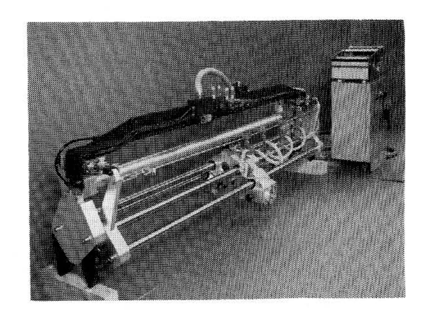


Fig. 268. — *Mesureur de rectitude*



Fig. 269. — *Convoyeur de rails MCR 2*

4.3.2. Rouleaux fous (fig. 270)

Ils sont constitués par un rouleau cylindrique comportant à chaque extrémité un roulement à billes et supportés par un axe horizontal reposant sur une charpente support fixée à une platine. Des goulottes de guidage amovibles guident le rail dans un seul sens d'acheminement ou dans les deux sens.

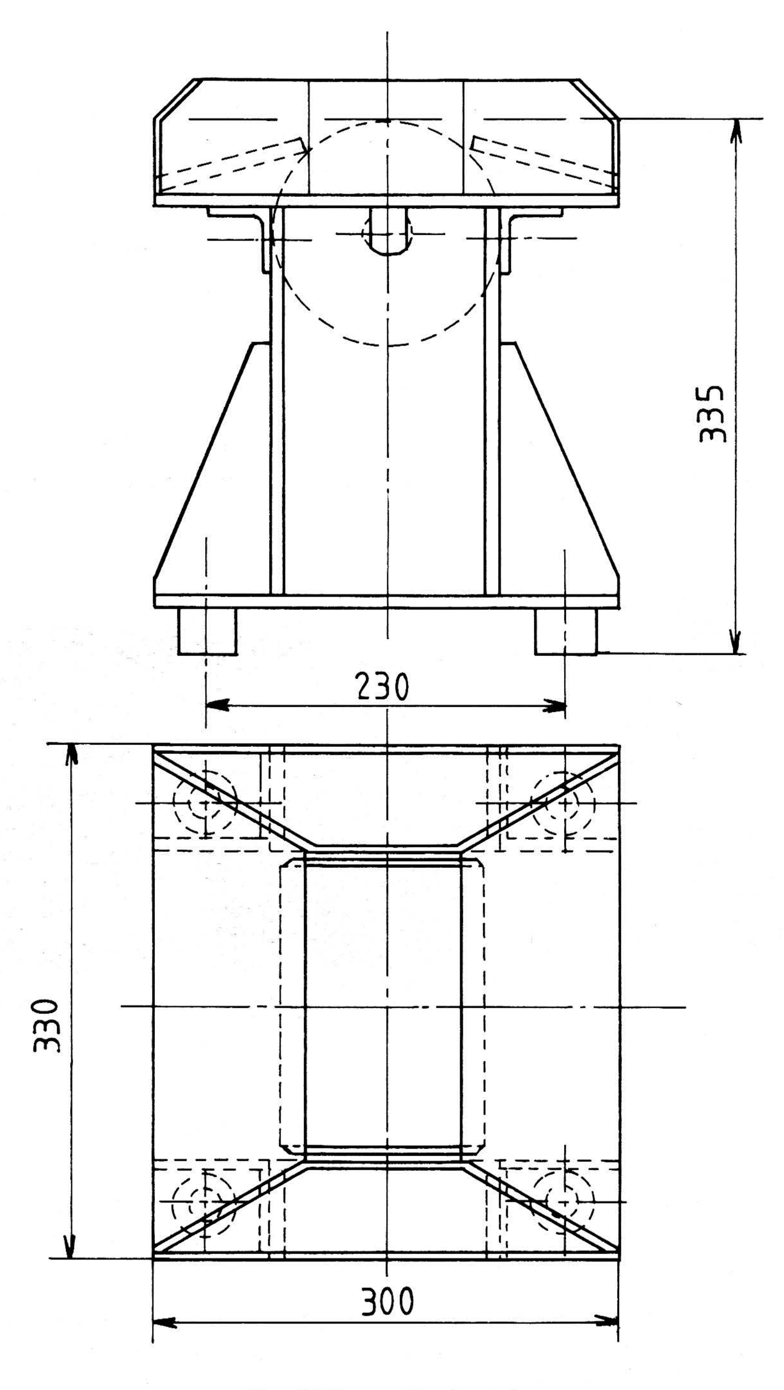


Fig. 270. — *Rouleau fixe*

4.3.3. Rouleaux moteurs (fig. 271)

Ils sont constitués par un rouleau cylindrique claveté sur un axe horizontal tournant dans des paliers à billes solidaires de la charpente support fixée à une platine. La transmission du mouvement de rotation s'effectue à partir d'un moto-réducteur (puissance 0,4 kW). Des goulottes de guidage amovibles guident le rail dans un seul sens d'acheminement ou dans les deux sens.

4.3.4. Rouleaux aligneurs (fig. 272)

Ils sont constitués par un rouleau moteur associé à un galet en forme de diabolo à un axe horizontal solidaire d'un bras double articulé à sa base.

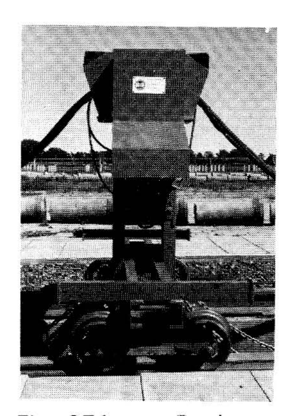


Fig. 271. — *Rouleau moteur*



Fig. 272. — *Rouleau moteur centreur*

4.3.5. Rouleaux presseurs entraîneurs (fig. 273)

Cet équipement lourd (RPE 9) permet d'entraîner de manière puissante et constante les longs rails soudés pour assurer leur déplacement le long du convoyeur de rails.

Ce matériel est implanté en aval de la soudeuse à divers endroits déterminés en fonction des caractéristiques de l'installation. Cet équipement comprend un moto-réducteur (puissance de 9,2 kW), un galet presseur en forme de diabolo appliqué sous pression sur la table de roulement du rail et un dispositif de détection de présence du rail.

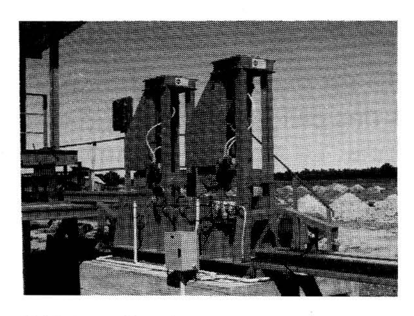


Fig. 273. — *Rouleau presseur entraîneur*

4.3.6. Convoyeurs pré-assemblés motorisés ou non

Ils sont constitués par des éléments pré-assemblés de 6 m de longueur. Chaque élément motorisé est équipé de deux rouleaux moteurs distants de 3 m.

4.4. Tables de transfert transversal et de stockage automatiques de rails

4.4.1. Ces tables (MTA 4) ont pour but d'assurer une ou plusieurs des fonctions suivantes :

- l'alimentation sans interruption d'un poste de travail
- l'évacuation des rails d'un poste de travail vers un autre tout en constituant un stock intermédiaire pouvant donner à chacun des deux postes une certaine autonomie de fonctionnement
- l'évacuation des rails vers une aire de stockage
- possibilité d'allers et retours dans le trajet des rails afin de se plier aux impératifs topographiques du site.

Suivant le cas, des solutions différentes sont appliquées. Elles résultent de la combinaison d'éléments standards en fonction de la longueur des rails à transférer et de la largeur de la table.

4.4.2. Chariots pneumatiques tractés (fig. 274)

4.4.2.1. Ils sont constitués par un vérin à axe vertical monté sur un châssis équipé de 4 roues de wagonnet. Ces chariots se déplacent sur une voie étroite située au-dessous des rails à transférer. L'un des chariots comporte les éléments de détection qui permettent le fonctionnement automatique de l'ensemble.

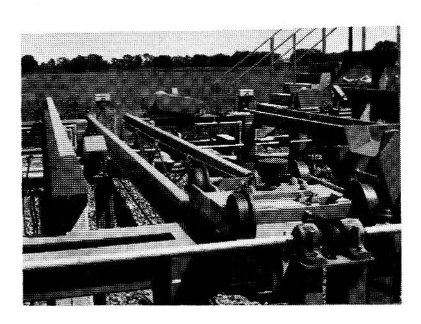


Fig. 274. — *Chariot pneumatique tracté*

4.4.2.2. Fonctionnement en alimentation (destockage). Les rails étant disposés en une couche sur les sous-traits constituant la table de transfert, les chariots vont se placer sous celui de ces rails qui se trouve le plus proche du convoyeur à alimenter. Ce rail est détecté par un capteur se trouvant sur l'un des chariots.

Lorsque les chariots sont en place, les vérins sont alimentés ce qui soulève le rail de ses sous-traits et permet la rotation du motoréducteur de traction qui va amener le rail sur les rouleaux du convoyeur en position d'attente à proximité de celui-ci. Lorsque le rail est déposé sur les rouleaux, les chariots retournent immédiatement chercher le rail suivant.

4.4.2.3. Fonctionnement en évacuation (stockage) : La position de garage des chariots est sous le convoyeur à rouleaux. Lorsque le rail est arrêté pour évacuation, les vérins sont alimentés et le rail est soulevé puis déplacé vers la table d'évacuation.

Les moyens de détection dont l'un des chariots est équipé permettent l'arrêt et la dépose du rail devant le premier rail déjà en place sur la table.

4.4.3. Chariots motorisés d'alimentation et d'évacuation (fig. 275)

4.4.3.1. Ils sont constitués par une poutre rigide montée sur deux bogies moteurs et pouvant se déplacer sur deux rails disposés perpendiculairement aux rails à transférer.

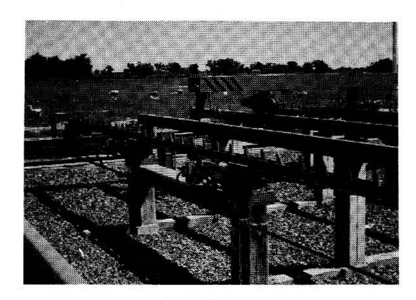


Fig. 275. — *Chariot d'alimentation et d'évacuation*

La poutre est équipée d'un ensemble de 4 bras mobiles sous l'action d'un vérin pneumatique, ce qui permet la préhension de rails de longueur comprise entre 6 et 18 mètres. Pour des longueurs supérieures, il est possible de jumeler deux de ces chariots.

4.4.3.2. Fonctionnement en alimentation (destockage). La position de garage de l'engin est au-delà du convoyeur à rouleaux. En l'absence de rail sur le convoyeur, le chariot motorisé avance jusqu'au rail le plus proche qui doit être centré par rapport au stock.

Le rail étant détecté, il est soulevé et transféré jusqu'au convoyeur à rouleaux. Le rail est alors déposé sur les rouleaux et le chariot recule jusqu'à sa position de garage.

4.4.3.3. Fonctionnement en évacuation (stockage) : La position garage de l'engin est toujours au-delà du convoyeur à rouleaux. Lorsque le rail est arrêté sur les rouleaux, centré par rapport à la table de transfert, le chariot motorisé avance, soulève le rail et le transporte jusqu'au premier rail déjà en place, devant lequel il le dépose. Le chariot retourne ensuite à sa position de garage et autorise l'utilisation du convoyeur pour une nouvelle opération.

4.4. *Ripeurs à taquets* (fig. 276)

Ils sont constitués par une poutre mobile longitudinalement sous l'effet d'un vérin pneumatique. La poutre est équipée de doigts articulés dans un sens et bloqués en sens inverse. Les ripeurs sont placés perpendiculairement aux rails à transférer. Ils permettent de déplacer toute la nappe de rails placés sur les sous-traits de la table de transfert et sur les rouleaux du convoyeur amont.

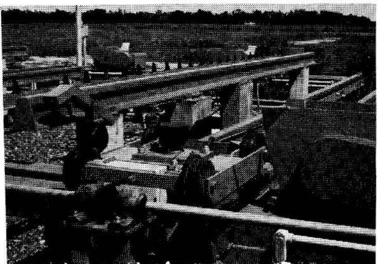


Fig. 276. — *Ripeur à taquets*

Les doigts articulés avancent sous l'effet du vérin de telle façon que chacun vienne occuper la place du rail précédent. Les doigts retournent ensuite à leur position de repos en s'escamotant au passage sous les rails. Ils reprennent ensuite par gravité une position d'attaque.

4.5. *Chenilles de transfert* (fig. 277)

Les rails sont posés à une extrémité des appareils au moyen d'un dispositif de transfert court. Les moto-réducteurs sont ensuite commandés pendant un temps correspondant au déplacement maximal de la chaîne à galets pour un cycle.

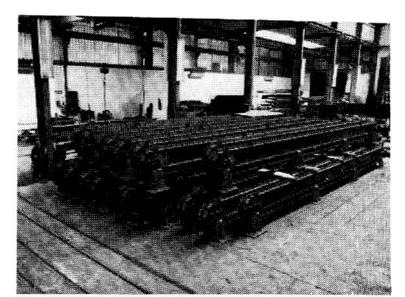


Fig. 277. — *Chenilles de transfert*

Le rail se déplace et entre en contact avec les rails déjà en place sur la table. A partir de ce moment-là, l'ensemble des rails reste immobile et la chaîne continue à défiler sous leur patin grâce aux galets dont elle est munie.

Ces chenilles servent à transférer mais également à supporter les rails pendant tout le temps de transfert. Elles sont constituées par un châssis rigide relié au sol et supportant une chaîne sans fin équipée de galets fous en contact avec les rails à transporter. La chaîne est entraînée en rotation par un moto-réducteur individuel.

4.6. Caractéristiques générales des équipements de transfert

— chariots tractés
  - nombre de chariots (rails de 6 à 36 m) 7
  - puissance électrique .... 2 × 0,37 kW
  - force des vérins à 5 bars .... 7 × 1 000 kg
  - vitesse de translation .... 15 m/mn

— chariots motorisés
  - nombre de chariots (rails de 6 à 36 m) 2
  - puissance électrique .... 4 × 0,37 kW
  - force de levage à 7 bars .... 2 × 2 335 kg
  - vitesse de translation .... 11,5 m/mn

— ripeurs à taquets
  - nombre de ripeurs (rails de 6 à 36 m) 7
  - force de déplacement à 7 bars .... 7 × 1 700 kg
  - nombre de rails déplacés à la fois 25

— chenilles de transfert
  - nombre de chenilles (rails de 18 à 36 m) 5
  - puissance des moto-réducteurs .... 5 × 0,37 kW
  - vitesse de transfert .... 5 m/mn

4.7. Dispositif de centrage automatique de rails (fig. 278)

Ce dispositif (MCA 36) permet de régler avec une très grande précision (précision de centrage de 50/00) la position d'un rail acheminé sur un convoyeur, par rapport à l'axe d'une table de transfert et de stockage de rails.

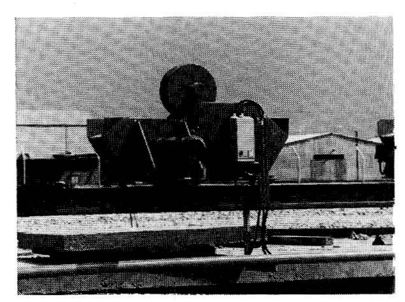


Fig. 278. — *Centrage automatique des rails*

De fonctionnement entièrement automatique et commandé par un calculateur électronique, ce dispositif est utilisé lorsque

— le prélèvement à partir d'une table de rails de différentes longueurs se fait par un portique fixe : quelle que soit la longueur du rail sélectionné, le crochet est toujours au centre de celui-ci

— des marquages à la peinture faits au milieu des rails à des fins de classification (degré d'usure, etc.) doivent se trouver sur une seule ligne pour faciliter la sélection.

Le dispositif comprend :

— deux roues génératrices d'impulsions espacées d'une longueur équivalente à la demi-longueur du rail le plus long à centrer

— un dispositif pneumatique de soulèvement et d'abaissement des roues.

La première roue prend la mesure de longueur du rail, la deuxième roue détecte le passage de la section correspondant au milieu du rail.

L'ensemble est monté sur supports élastiques dans l'axe du convoyeur de rails.

Les mouvements de la totalité des moyens de convoyage et de transport sont commandés soit par un automate programmable, soit par des armoires électroniques à fonctionnement entièrement automatique qui assurent sans aucune intervention humaine tous les transferts de rails le long de la chaîne.

4.8. Chargement en bout (fig. 279)

A la fin de la chaîne, les LRS sont chargés sur des rames de wagons spécialisés en vue d'assurer leur dépose en voie. Pour faciliter cette dépose, l'extrémité aval de chaque LRS est munie d'un petit coupon percé d'un trou, éliminé après déchargement. Les LRS soudés et parachevés sont amenés par des convoyeurs à rouleaux sur une estacade de chargement longée par une voie sur laquelle stationne la rame du wagon. Une fois en place sur l'estacade, le rail est repris progressivement par un chariot à treuil circulant le long de l'estacade et qui met en place les LRS sur la rame.

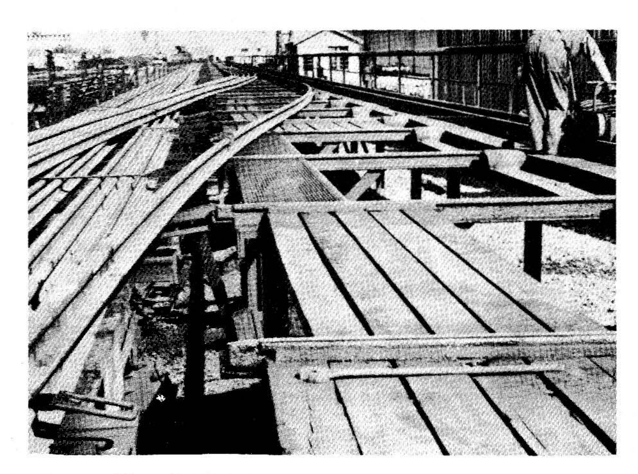


Fig. 279. — *Chargement en bout*

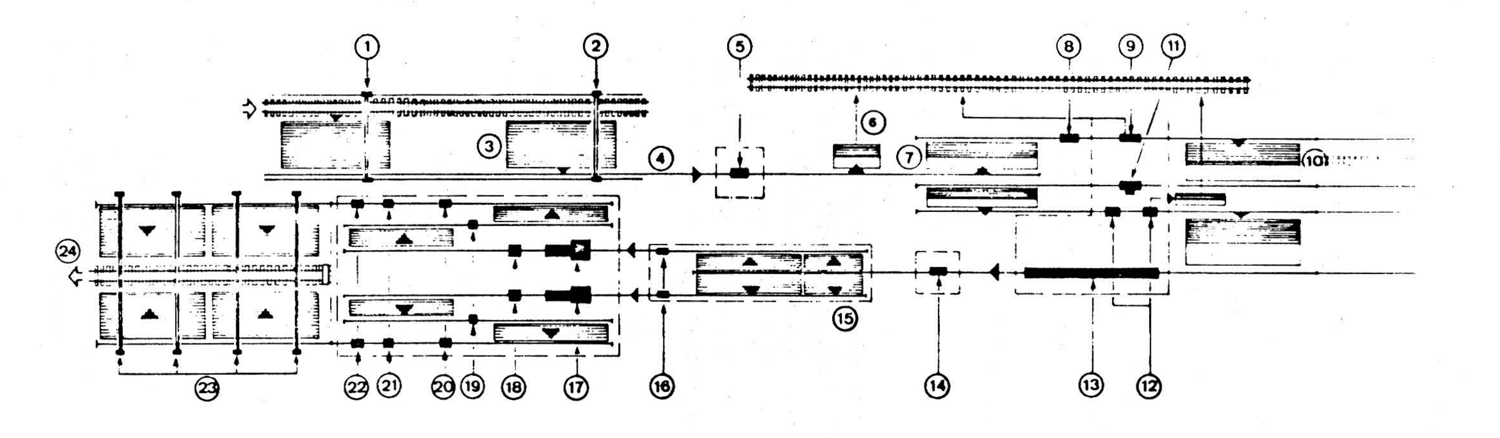
5. Implantation des usines

5.1. Le choix et la disposition du terrain jouent un rôle très important dans la conception et la construction des usines de soudure et régénération. Assez fréquemment, on a installé l'usine en extension d'un atelier existant, soit de l'équipement, soit du matériel roulant. Plus récemment, on a construit certaines d'entre elles ex nihilo. Une usine peut traiter, nous l'avons vu, des rails neufs ou des rails prove-

nant de déposes et produire des rails de longueurs standards ou des LRS. En tout état de cause, si la réalisation d'origine n'est que partielle, il est hautement souhaitable de prévoir pour l'avenir le maximum d'extensions possibles. Ceci est d'autant plus facile à réaliser que le plus souvent les ateliers de la voie sont installés loin des agglomérations dans des zones rurales où le coût du terrain n'est pas prohibitif.

5.2. L'implantation doit être réalisée dans le sens de la longueur, surtout pour la production de LRS qu'il est économique de faire les plus longs possible (sur la SNCF, par exemple, 432 mètres soit 12 longueurs de 36 mètres, exigeant 11 soudures électriques. On doit donc pouvoir aligner deux barres, l'une en cours de chargement, l'autre en cours de fabrication. Avec le stockage de rails en amont, la mise en place et le brossage, c'est donc une longueur de l'ordre de 1 000 mètres qu'il faut prévoir ; la limitation de longueur des barres à 360 ou 324 mètres permet de réduire cette longueur totale de 150 à 250 mètres.

5.3. Dans le sens de la largeur, c'est l'importance du stock de rails neufs ou usés qui permet de déterminer la dimension. Une largeur totale d'une centaine de mètres paraît souhaitable. Cette largeur peut être sensiblement réduite dans la zone de chargement, ce qui entraîne une surface totale voisine de la dizaine d'hectares. Si le terrain disponible est trop court, on peut prévoir un rebroussement du LRS, soit un gain de 300 ou 400 mètres, au détriment bien sûr de la largeur. Lorsque l'on envisage de régénérer des rails provenant de dépose, il est intéressant de disposer la chaîne de traitement (contrôle, dressage et reprofilage) parallèlement à la chaîne de soudage, mais fonctionnant en sens inverse. Si nécessaire, les tables de transfert automatiques permettent sans difficulté de prévoir plusieurs rebroussements. La figure 280 montre le schéma de l'installation réalisée par la société Matix à Pontassieve près de Florence pour le compte des chemins de fer italiens, cette installation destinée à la régénération en longueurs de 36 m de rails usés étant équipée d'une double ligne de soudage, une par file de rails.



(1) Déchargement et présélection des rails
Unloading and selecting rails
Abladen und Vorsortieren der Schienen

(2) Stock des rails à reconditionner
Stock of rails to be reclaimed
Lagerstapel der aufzuarbeitenden Schienen

(3) Sciage d'abouts endommagés
Cutting off damaged rail ends
Wegsägen beschädigter Schienenenden

(4) Brossage de la table de roulement
Brush-cleaning the rail running surface
Sauberbürsten der Schienenlauffläche

(5) Contrôle ultrasonique des rails
Ultrasonic testing for internal rail flaws
Ultraschallkontrolle der Schienen

(6) Redressage vertical et horizontal des rails
Straightening the rails vertically and horizontally
Horizontales und vertikales Geraderichten der Schienen

(7) Elimination par sciage des parties de rails défectueuses (suite aux ultrasons)
Cutting off rail sections where flaws have been found by ultrasonic testing
Aussägen der bei der Ultraschallprüfung erfassten Fehler

(8) Reprofilage du champignon de rails
Profiling the rail head
Nachprofilierung des Schienenkopfes

(9) Mesure de l'usure verticale
Measuring vertical rail wear and marking
Messung der vertikalen Abnutzung

(10) **Nettoyage des abouts à souder**
Cleaning rail ends prior to welding
Reinigung der zu verschweissenden Schienenenden

(11) Soudage et ébavurage des rails
Rail welding and trimming
Schweissung und Abgratung der Schienen

(12) Sciage des rails à la longueur et perçage des trous d'éclisse
Cutting rails to length and drilling fishplate bolt holes.
Ablängen der Schienen und Bohren der Laschenbolzenlöcher

(13) Traitement thermique des abouts de rails
Heat treatment of rail ends
Wärmebehandlung der Schienenenden

(14) Meulage de finition des joints soudés
Precision grinding the welded rail sections
Fertigschleifen der geschweissten Schienenstösse

(15) Dressage à la presse des joints soudés
Press-straightening the welded rail sections
Pressrichten der geschweissten Stösse

(16) Mesureur de rectitude
Checking straightness
Messvorrichtung der Geradheit

(17) Stockage et chargement des longs rails soudés
Storing finished long welded rails ready for loading
Stapelung und Verladen der geschweissten Langschienen

Fig. 280. — *Schéma de l'usine de PONTASSIEVE*

6. Aspect économique des usines

6.1. Une installation de régénération peut largement produire 250 km de voie par an (500 km de rails). La soudure seule (rails neufs) pourrait atteindre des rendements supérieurs. L'ensemble de ces chaînes de traitement est hautement rentable pour les réseaux, car l'expérience a montré que ces types d'installations, bien qu'ils représentent un investissement important, ont, du fait de leur haut degré d'automatisation, un faible coût d'exploitation. 6 à 7 agents suffisent sur la ligne de soudage proprement dite, 4 à 5 étant nécessaires pour les manutentions amont et aval. Ils permettent d'assurer à la plus grande part des matériels déposés une seconde vie, ce qui constitue pour les réseaux une importante source d'économies.

6.2. L'annexe 9 donne un exemple de calcul, forcément sommaire car les coûts et en particulier les coûts salariaux et le loyer de l'argent varient sensiblement d'un pays à l'autre. La marge bénéficiaire de reconditionnement de rails est cependant tellement élevée que le reconditionnement se révèle comme une opération rentable quels que soient les coûts élémentaires des divers postes intervenant dans le calcul.

ANNEXE 9

Rentabilité d'un atelier de soudage et reconditionnement de rails

Les chiffres donnés en francs français (valeur janvier 1985) n'ont qu'une valeur indicative. Nous considérerons un atelier moderne équipé pour traiter à la fois des barres neuves et des rails de remploi à régénérer et capable de produire indifféremment des LRS et des barres ou coupons courts.

L'installation d'une telle usine représente, pour les seuls outillages et bâtiments correspondants, avec l'alimentation locale des machines une dépense globale de l'ordre de 50 MFF.

Le décompte de l'amortissement annuel correspondant s'établit ainsi

sur 10 ans à 10 % : $50 \times 0{,}1627 = 8{,}13$ MFF
sur 10 ans à 15 % : $50 \times 0{,}2 = 10$ MFF
sur 12 ans à 12 % : $50 \times 0{,}16143 = 8$ MFF

On peut donc admettre, quelles que soient les durées et taux d'amortissement, que ce dernier représente une charge annuelle de 10 MFF. Le fonctionnement de l'usine en deux postes de 8 heures nécessite un effectif d'une cinquantaine d'agents, soit une dépense annuelle de

$$0{,}15 \times 50 = 7{,}5 \text{ MFF}$$

Si l'on ajoute les dépenses diverses entre autres l'énergie et l'entretien, on peut tabler sur une dépense annuelle totale voisine de 25 MFF.

Une telle usine est capable de produire en reconditionnement l'équivalent de 7 000 rails de 36 mètres soit 125 kilomètres de voie par poste de 8 heures. En deux postes, on produit donc 14 000 rails, soit 250 kilomètres de voie.

Le prix de revient du mètre de rail reconditionné et soudé ressort donc à

$$25 \text{ MFF}/500\,000 = 50 \text{ FF}$$

Or, le mètre de rail neuf, départ usine coûte

$$3{,}5 \text{ FF} \times 60 = 190 \text{ FF}.$$

Dans les plus mauvaises conditions, le rail reconditionné est trois fois moins cher que le rail neuf, la valeur de récupération de ferraille du rail de dépose étant à peu près compensée par les coûts de passage des barres neuves en atelier de soudage.

RÉSUMÉ DU CHAPITRE 11

Les renouvellements de voie liés à l'état général du matériel (rails, traverses, attaches) du ballast et du nivellement général lui-même souvent dépendant de la qualité de la plate-forme permet en général de récupérer des rails réutilisables sur des lignes moins importantes, sous réserve de leur faire subir un traitement de régénération en usine. C'est pourquoi les grands réseaux se sont équipés de telles usines, généralement également capables de souder en LRS les rails neufs fournis par la sidérurgie.

Les usines polyvalentes telles que celles qui sont conçues et montées par la société Matix Industries sont composées d'éléments modulaires permettant de traiter aussi bien des rails de récupération que des rails neufs et de produire des rails de longueurs courantes aussi bien que des LRS. Les rails neufs sont simplements soudés (cf. chap. 6) et chargés sur rames spécialisées par chariots ripeurs. Les rails de remploi subissent au préalable un traitement plus complexe :

- élimination à la scie des parties mauvaises et en particulier des zones d'éclissage
- contrôle non destructif aux ultrasons et élimination des zones affectées de défauts
- dressage des rails dans deux plans perpendiculaires pour éliminer les défauts de dressage par des presses à haute puissance
- régénération de la table de roulement à l'aide d'une raboteuse à grande course ou d'une machine à couteaux fixes, ces deux types de machines se révélant plus intéressantes que les fraiseuses

- mesure de la hauteur des rails après reprofilage afin de les classer
- soudage en LRS et mesure de la rectitude des soudures
- recoupe éventuelle du LRS obtenu sous le contrôle d'un système de mesure de longueur et traitement thermique éventuel des abouts
- chargement ou stockage.

Toutes les manutentions sont normalement effectuées par des automates (rouleaux automoteurs, tables de transfert) dans le sens longitudinal et le sens transversal.

De telles usines qui n'emploient qu'une faible main-d'œuvre spécialisée nécessitent des surfaces de terrains importantes permettant des extensions ultérieures.

Enfin tous les calculs de rentabilité qui peuvent être faits montrent l'intérêt économique évident de la régénération en usine des rails de récupération et de leur repose pour une seconde vie sur des lignes à plus faible trafic.

CONCLUSIONS

L'examen d'ensemble du problème du rail auquel est consacré le présent ouvrage au double point de vue de son élaboration et de son utilisation nous a montré un cheminement comparable, mutatis mutandis, à celui de la vie humaine : le rail naît, passe par la force de l'âge, avec ses défauts et ses maladies, puis meurt, encore qu'une seconde existence puisse le plus souvent lui être assurée, dans le cadre d'une vieillesse moins rude que les conditions imposées par les contraintes qu'il subit lors de la première pose.

Nous avons vu que les deux aspects fondamentaux dans l'utilisation du rail sont la qualité et le prix de revient, ce qui revient à rechercher un rapport qualité-prix le plus élevé possible. La qualité joue un rôle fondamental surtout parce que le rail est une pièce maîtresse de la sécurité ferroviaire dont la rupture peut entraîner de très graves conséquences mais de toutes façons coûte toujours très cher, ne serait-ce que du fait des graves perturbations qu'elle apporte aux circulations ferroviaires. Le prix d'achat, de son côté, est un élément fort important compte tenu des tonnages annuels acquis par les réseaux d'où l'intérêt qui s'attache au reconditionnement en usine. Fort heureusement, l'évolution du prix de la tonne d'acier à rail n'a manifesté ces dernières années en monnaie constante aucune tendance à la hausse alors que la qualité s'est améliorée de façon spectaculaire grâce à l'application à sa technologie des progrès de la science moderne et ce dans de nombreux domaines. Ces progrès se sont traduits directement pour le plus grand bénéfice des réseaux utilisateurs par la chute significative du nombre de défauts et ruptures en voie imputables à

la fabrication et aussi à l'utilisation ainsi que par le doublement et même le triplement depuis une vingtaine d'années de la durée de vie en voie.

Nous avons pu constater que ces améliorations spectaculaires étaient la résultante de toute une série de progrès accomplis dans des domaines très variés : connaissance plus précise des contraintes qui s'exercent dans le voisinage du contact rail-roue ainsi que dans l'ensemble de la section, meilleure appréciation d'un profil géométrique voisin de l'optimum grâce à l'application de la méthode des éléments finis, progrès décisifs dans l'élaboration de l'acier à rails grâce à la coulée continue, la métallurgie en poche et l'automatisation , introduction de l'informatique dans l'ensemble des activités qui concernent la fabrication du rail, développement des moyens de contrôle et de traitements préventifs et curatifs.

Des progrès, certes, restent à faire dans le cadre d'une meilleure approche scientifique de certains problèmes directement liés au rail : calcul exact des contraintes, conditions de naissance et de développement de certains types de défauts de fatigue, tels que les taches ovales et le shelling, développement de nuances résistantes à l'usure, etc ; les études en cours dans divers pays permettent certainement à relativement bref délai une amélioration continue de la qualité, donc de la durée de vie. Par ailleurs, certaines techniques de soudure, le bombardement électronique ou le rayon laser par exemple, ainsi qu'une meilleure connaissance de la microstructure de la matière et de la mécanique de la rupture permettront dans l'avenir une adaptation constante du "produit-rail" aux contraintes croissantes qu'on continuera de lui faire subir : les chemins de fer du monde entier en effet se développent sous la pression des besoins en transports de masse et l'augmentation constante des vitesses, des charges par essieu et du tonnage total transporté conduisent à exiger toujours plus du rail, support de base de la totalité du trafic ferroviaire.

Nous ne saurions trop insister sur un autre point tout aussi fondamental que la qualité intrinsèque du rail ; son coût d'utilisation, lié bien sûr à son prix d'achat et à sa durée de vie, mais au moins autant aux conditions dans lesquelles est effectuée sa maintenance et nous avons longuement insisté sur ce point ; car un matériau, même de très haute qualité, ne peut conduire qu'à des déboires s'il ne fait pas l'objet de soins constants, en vue de le maintenir en permanence dans un état aussi voisin que possible de l'état neuf.

Or la maintenance est chose délicate et ingrate : délicate parce qu'elle nécessite une connaissance approfondie des mécanismes qui la régis-

sent ainsi qu'une formation professionnelle de haut niveau du personnel concerné, ingrate car elle n'apporte aucun résultat spectaculaire aux responsables de tous niveaux hiérarchiques : elle ne peut que se traduire par des déceptions en cas de défaillance, à terme, pour ceux qui en ont la charge. Nous avons par ailleurs insisté sur le fait que la maintenance curative n'était qu'un pis-aller, qui corrige les insuffisances de la maintenance préventive et qui nécessite de son côté des règles très strictes pour en limiter les inconvénients : une rupture ou une avarie de rail, par exemple, ne se réparent pas sans un grand luxe de précautions.

La maintenance préventive nécessite des investigations et des contrôles de plus en plus lourds, mais aussi de plus en plus payants. Dans ce domaine, l'analogie avec le corps humain est particulièrement frappante : la médecine préventive (examens de contrôles, enregistrements tels que les électro-cardiogrammes, vaccinations) a pour ambition, malgré son coût, de se substituer autant que faire se peut à la médecine de soins, donc à la maladie et aux souffrances qu'elles entraînent et finalement à allonger l'espérance de vie : effectivement, une meilleure prévention, une meilleure hygiène, une meilleure alimentation reculent progressivement les limites de l'âge moyen de l'homme et ce à un meilleur coût global.

Le rail est soumis à des contraintes tout à fait comparables : compte tenu de son prix d'acquisition, de celui de son remplacement et des perturbations que ce dernier entraîne dans le trafic d'autant plus d'ailleurs qu'il est plus important, il est hautement rentable de reculer de quelques mois, voire de quelques années l'âge de sa retraite. La mécanique, la chimie, l'électronique se font les garantes de ces progrès.

Enfin, nous avons vu l'intérêt présenté par le reconditionnement en usine de rails déposés des voies, qui permet à la fois la récupération d'un matériau conservant encore après quinze ou vingt ans de services intensifs une valeur marchande élevée et l'équipement des voies de lignes à trafic moyen ou faible dans des conditions leur permettant de supporter des charges et des vitesses plus élevées. Il s'agit là plus d'une opération de rajeunissement que de chirurgie esthétique. Le problème du rail, tel qu'il se pose à un réseau, doit donc faire l'objet d'une étude d'ensemble portant sur ses caractéristiques, son trafic et la répartition de ce dernier, ses conditions d'approvisionnement et ses possibilités de réemploi : ce n'est qu'à ce prix que le rapport qualité-prix du rail, qui doit revêtir un aspect global, sera résolu de façon satisfaisante. L'acier à rail est un acier de haute qualité, qui fait partie des fabrications de pointe d'une sidérurgie et constitue par

conséquent un élément moteur de la recherche correspondante. Par là-même, il concourt à la compétitivité du transport par fer ; malgré certains concurrents au guidage par le rail que l'on voit depuis peu apparaître dans le domaine des hautes vitesses et dans celui de certains types de transports urbains et suburbains de voyageurs, le rail reste encore, dans le cadre d'un horizon indéterminé, le moyen de transport guidé idéal pour les transports de masse de voyageurs et de marchandises. On peut donc assurer qu'il continuera dans un avenir indéterminé à développer, sous l'aiguillon de la concurrence, ses qualités actuelles dans le cadre d'un enrichissement technologique de plus en plus lié au progrès scientifique. Le rail, dans son ensemble, reste donc un grand sujet d'études pour les techniciens et chercheurs de laboratoires sidérurgiques et les spécialistes ferroviaires.

BIBLIOGRAPHIE

— J. ALIAS, La voie ferrée
— J. ALIAS, Cours de chemin de fer à l'École Nationale des Ponts et Chaussées
— WILLIAM W. HAY, Railroad Engineering
— British Railway Track
— FASTENRATH, Die Eisenbahnschiene
— F. OLIVEROS RIVES, A. LOPEZ PITA, M. MEGIA PUENTE, Tratade de Ferrocarriles
— Rail Technology, compte-rendus du Congrès de Nottingham (1981)
— MELENTEV, POROCHINE, FADEEV, Soderjaniie i remont relsov
— Cours de chemin de fer de l'ENPC (Paris) de RENEVEY, MARTINET, R. LEVI, GONON, FEYRABEND
— Collection des cours SNCF à l'usage des chefs de district
— Compte rendus de la Commission Mixte des Rails
— Documents établis par le Département des Recherches Voie SNCF
— DE FONTGALLAND, le système ferroviaire dans le monde
— JANES WORLD RAILWAY
— FUNKE, Schienenschleifen
— B. BARTHELEMY, Notions pratiques de mécanique de la rupture
— DEROCHE, Symposium sino-français de la sidérurgie (1985)
— KOUTCHOUK, IATIENKO, LIEBEDEV, Le soudage en bout par étincelage continu
— L. SCHWARTZ, Méthodes mathématiques pour la science physique

— J. MAX, Méthodes et techniques de traitement du signal
— WILMET, Cours de chimie de l'École Polytechnique de Paris
— DE LEYRIS, Cours de métallurgie
— Rapports de l'ORE :
D 88 - Défauts des rails en voie, (1965-1968)
C 53 - Comportement des rails (1961-1976)
C 70 - Profils d'usure (1964)
D 120 - Étude de profil d'un rail lourd (1971-1974)
A 91 - Analyse des statistiques d'avaries de rails (1974)
D 150 - Moyens d'amélioration des rails (1980)
D 141 - Usure des rails (Velim 1980)
Détermination des tensions résiduelles dans les rails (1983)
BESSELING & VAN BOMMEL - Calcul des contraintes dans le champignon (ORE)
D 148 - Mesures dans les zones de soudure
— CURTEL, Mémoire sur la fabrication et le prix de revient des rails (1857)
— FLACHAT, Étude sur l'usure et le renouvellement des rails (1864)
— BRAME & VICAIRE, Comparaison des rails Vignole et DC (1881)
— FREMONT, Usure et défauts des rails (1924)
— HUYGHE, Fabrication des rails (1929)
— CHARTET, Notes sur l'usure ondulatoire (1951- documentation SNCF)
— FEYRABEND, Détermination du poids d'un rail économique (1957, ORE D 27)
— GASCOIN, Soudure des rails (1962)
— R. SAUVAGE, Thèse de doctorat sur la flexion des rails sous l'action des charges roulantes (1961)
— UNION PACIFIC, Durcissement des rails à la flamme (1963)
— DURAND, Défauts caractéristiques des rails et soudures (1963)
— HANNA, theoretische und experimentelle Untersuchung der Spannungen im Inneren des Schienenkopfes (1967)
— Compte rendu des "Journées Françaises du Rail" (1970)
— EISENMANN, DUWE, LEMPE, LEYKAUF, Beiträge zur Erforschung der Beanspruchung von Fahrbahnkonstruktionen (1976)
— Compte rendus du Symposium de Denver (1978)
— HERBST, ist eine neue Schienenprofilform wünschenswert ?
— DUBBELDAM, calcul des sollicitations d'un rail sous les efforts Y & Q (documentation technique de l'ORE, 1980)
— CHMIEL, contrôle ultrasonore des rails (1980)
— JAKOBY, mechanische Eigenschaften aluminothermische Schienenschweissungen in Abhängigkeit von chemischen Zusammen-

setzung und Wärmennachbehandlung der Schweissverbindung der im Gleis auftretenden Belastungen (1981)
— International Symposium on rail steel (Halifax Canada 1982)
— Fatigue cracks initiation properties of rail steel (1982)
— Compte rendus du Nordic Seminar on rail reprofiling by grinding
— Compte rendus de la 3e conférence sur le contrôle non destructif (Florence 1984)
— Compte rendus de la Commission Mixte des Rails
— Documents établis par le Département des Recherches voie SNCF
— Documentation technique des sociétés UNIMETAL, MATIX & SPENO INTERNATIONAL
— Revue Générale des Chemins de Fer
— Informations techniques de la Direction de l'Équipement de la SNCF
— Eisenbahn Technische Rundschau
— der Eisenbahningenieur
— International Railway Journal
— Permanent Way (Tokyo)
— Rail Engineering International
— Rail International (AICCF)
— Rail Track & Structure
— Railway Age
— Railway Gazette
— Revue de l'American Railway Engineering Association
— Revue de métallurgie
— Modern Railroads
— Progressive Rail
— La Vie du Rail
— La Vie du Rail d'Outremer
— Le rail et le monde

Composition - Montage : COMPO 2000 - Saint-Lô

Imprimé en France. — JOUVE, 18, rue St-Denis, 75001 Paris
N° 17709. Dépôt légal : Septembre 1987
N° d'Editeur : 4608